



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

**“CARACTERIZACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN EN
TRES DIMENSIONES DE CAMPOS DE
TEMPERATURA Y COLOR ESPECTRAL DE
FLAMAS CON SIMETRÍA AXIAL UTILIZANDO
FOTOGRAFÍA DE MOTEADO LÁSER DIGITAL.”**



Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Óptica)

Presenta: Juan Carlos Israel Zamarripa Ramírez

Director de Tesis: Dr. David Moreno Hernández

León · Guanajuato · México

Noviembre de 2021

Vo. Bo.

“Versión final, incluye cambios sugeridos por revisores”.

Dedicado a la memoria:

De mis padres

† Juan Carlos Zamarripa Martínez

† Carolina Ramírez Gutiérrez

Agradecimientos

A mis padres Carlos Zamarripa y Carolina Ramírez, que con todo el pesar de mi corazón al inicio de esta etapa me toco perder a mi querida madre, sin embargo, me encuentro agradecido con ella y no existirá día en que ese sentimiento de tristeza se ha convertido en cariño y agradecimiento por haberla tenido a mi lado, además de siempre encontrar en ella sabías palabras y aliento en mi continua educación. A mi tía Carmen Ramírez por recordarme que ella ahora funge como una persona con la que puedo contar y que siempre encontraré apoyo, siendo afortunado por tenerla como mi segunda madre. A mi hermano Omar Ortega, que, aunque no llevemos la misma sangre siempre ha estado para mi cuando más lo necesito y que en su familia siempre encontré alegrías y otro hogar, así como un refugio en el deporte. Y así como algunos tienen que partir por la naturaleza de la vida, otras personas llegan para demostrarnos que la vida sigue y debemos marchar siempre hacia adelante tal como mi esposa María del Rosario y mi hermosa hija Mía Carolina, en las cuales siempre encuentro la fuerza, alegría y voluntad para salir adelante.

De esta institución, a mis compañeros Luis, Edwin, Steven, Bruno y Peter con los cuales he llegado a tener una buena relación de compañerismo y amistad. A mis compañeros de generación de maestría Leidy y Mario que, aunque pasa el tiempo, siempre me muestran su gran calidad humana como personas. A mi compañera Etna por las pláticas en clase y pasillos y siempre encontrar algunos puntos en común tanto de amistad como de opinión.

En cuanto al personal de la institución, a mi asesor de tesis el Dr. David Moreno Hernández por su gran apoyo y esfuerzo, por ser mi guía durante este trabajo de investigación y no sólo eso, sino un pilar cuando sentía que me desmoronaba y que no cumplía el objetivo, así que consideró que él no sólo ha sido un asesor sino un mentor y guía tanto en lo académico como emocional. Agradezco también al Dr. Moises Cywiak Gabarcewicz por su amabilidad y sus sabios consejos tanto académicos como de vida, ya que han impactado de forma positiva en mí y en mi trabajo académico como docente. Gracias a la Dra. Reyna Araceli Quiroga y la Dra. Alma por su apoyo en cuanto a material para mi trabajo doctoral ya que siempre encontré un servicio y preocupación por tener los instrumentos necesarios para poder desarrollar mi tesis. Al Dr. Mauricio Flores por sus buenos comentarios y observaciones durante todo mi trabajo doctoral que contribuyeron para el objetivo final. Al Dr. Abundio

Dávila por fungir como evaluador en la recta final, dando una retroalimentación asertiva y reiterando su apoyo para la mejora de mi trabajo. A la Dra. Amalia Martínez García, por su revisión y comentarios respecto al presente trabajo. Agradezco a mis profesores y de manera particular al personal del laboratorio de optomecatrónica por su continuo apoyo mediante sugerencias y suministro de materiales. Al personal de taller mecánico (Luis y Marco) por su continuo apoyo en procesos de maquinado.

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca doctoral otorgada para este trabajo de investigación.

Resumen

En esta tesis, se introduce un método novedoso para la medición de forma sincrónica de temperatura y emisión de radicales en flamas. Siendo conveniente describir de manera general el estado del arte del presente trabajo, se hace mención de ciertas técnicas de medición de temperatura como color espectral en flamas (capítulo 1).

Para la medición de temperatura se utiliza la técnica de Fotografía de Moteado Láser Digital (FMLD). Para la cual se realizó el estudio de temperatura en 3 objetos de fase. Debido a la simetría axial presente en uno de ellos se utiliza la deconvolución de los datos por medio de la Transformada de Abel (capítulo 2).

Por otra parte, para la medición sincrónica se hace uso de una cámara a color, la información de temperatura se almacena en el canal rojo, mientras que los canales verde y azul, contienen la de emisión de los radicales. Debido a la construcción del sensor de la cámara existe un efecto “crosstalk”, por tanto, la necesidad de un algoritmo para la reducción de este efecto y del ruido de fondo en los canales azul y verde surge.

Para los resultados de la técnica se realiza el análisis a 6 diferentes mezclas de combustible-aire que van de una razón estequiométrica $\Phi = 1.05$ a $\Phi = 1.21$ (capítulo 3).

Se presenta también un método de corrección para el ruido de moteado, utilizando una ecuación diferencial parcial de 4° orden. Presentando como resultado final la reconstrucción en 3D de los espectros de emisión de los casos anteriores (capítulo 4).

En el último apartado, se habla sobre las conclusiones y resultados obtenidos de este trabajo doctoral (capítulo 5).

AGRADECIMIENTOS I

CAPITULO 1 TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y COLOR ESPECTRAL EN FLAMAS. 11

1.1. Referencias 16

CAPITULO 2 FOTOGRAFÍA DE MOTEADO LÁSER DIGITAL PARA MEDIR CAMPOS DE TEMPERATURA. 19

2.1. El fenómeno de moteado. 19

2.1.1. Moteado objetivo 21

2.1.2. Moteado subjetivo 22

2.2. Sistemas de medición 23

2.2.1. Sistema de medición (A) 23

2.2.2. Sistema de medición (B) 31

2.2.3. Sistema de medición (C) 24

2.2.4. Sistema de medición (D) 25

2.3. Algunas consideraciones para tomar en cuenta en la medición de temperatura. 26

2.3.1. Análisis de imágenes usando la técnica de doble exposición 27

2.4. Ecuación de Gladstone-Dale 28

2.5. Transformada de Abel 29

2.5.1. Solución analítica de la transformada de Abel y cálculo de temperatura. 31

2.6. Arreglo experimental 34

2.6.1. Descripción de los objetos de fase. 35

2.6.2. Procedimiento experimental 36

2.7. Conclusiones. 38

2.8. Referencias 38

CAPITULO 3 MEDICIÓN SIMULTÁNEA DE TEMPERATURA Y COLOR ESPECTRAL DE FLAMAS

40

3.1.	Valor estequiométrico	41
3.2.	Flamas Laminares premezcladas	42
3.2.1.	Flamas típicas de laboratorio: El mechero de Bunsen	42
3.3.	Relación de la razón de equivalencia, velocidad y temperatura.	44
3.4.	Mediciones de espectro de color, corrección del efecto crosstalk.	44
3.5.	Algoritmo de procesamiento de imágenes para obtener el espectro de color visible	47
3.6.	Arreglo experimental	49
3.7.	Análisis de Datos.	52
3.8.	Análisis de resultados	55
3.9.	Conclusiones	60
3.10.	Referencias	60

CAPITULO 4 RECONSTRUCCIÓN EN TRES DIMENSIONES DEL COLOR ESPECTRAL DE FLAMAS.

62

4.1.	Eliminación de ruido de moteado.	62
4.2.	Ecuación de cuarto Orden	63
4.3.	Ajuste de curvas por medio de un ajuste Gaussiano.	64
4.4.	Transforma de Abel del espectro de emisión de la flama.	65
4.5.	Aplicación del procedimiento de procesamiento de imágenes.	66
4.6.	Resultados flujos volumétricos.	68
4.7.	Conclusiones	72

4.8. Referencias	73
CAPITULO 5 CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO.	75
5.1. Conclusiones.	75
5.2. Trabajo a futuro.	76

Figuras

Figura 2.1 Generación de un patrón de motas como consecuencia del fenómeno de interferencia.....	20
Figura 2.2 Arreglo simple de moteado objetivo.....	21
Figura 2.3 Moteado subjetivo.....	22
Figura 2.4 Sistema de medición tipo (A).....	24
Figura 2.6 Sistema tipo (C).	24
Figura 2.7 Sistema tipo (D).	25
Figura 2.8 a) Poco contraste y baja densidad, b) excesivo de tamaño y poca densidad, c) Tamaño excesivo de algunos puntos, además de bajo contraste y distribución anormal, d) Patrón de motas deseable, e) Excesivo tamaño y poca densidad, f) No existe una densidad uniforme ni tamaño.....	27
Figura 2.9 Diagrama simplificado del algoritmo de correlación cruzada a) Imágenes de referencia (t) y de objeto deformado (t+ Δ t), b) Selección de la misma región para la ventana de interrogación en las dos imágenes, c) Multiplicación de las dos Imágenes en el plano de Fourier, d) Detección del desplazamiento del pico máximo.	28
Figura 2.11 Desviación del rayo de luz por efecto de la variación del índice de refracción como consecuencia del objeto de fase.....	29
Figura 2.5 Sistema moteado tipo (B).....	32
Figura 2.12 Arreglo óptico de FLMD. 1-Láser, 2-Filtro espacial, 3-Cámara Digital, 4-Vidrio Esmerilado, 5-Objeto de fase y 6-Espejo esférico.....	34
Figura 2.13 Soplete a), Resistor b) y tanque regulado c).	36

Figura 2.14 Imágenes de moteado con los desplazamientos respectivos sobrepuestos a) Resistencia cerámica, b) Flama de la vela, c) Flama del soplete.....	37
Figura 2.15 Campos de temperatura promedio a) Resistencia Cerámica, b) Flama de la vela, c) Flama axisimétrica generada por el soplete de gas butano, TM indica la posición de la medición de termopar.	38
Figura 3.1 Diagrama Vectorial de la velocidad en una flama premezclada.	43
Figura 3.2 Distribución de un filtro tipo Bayer (7).....	44
Figura 3.3 Respuesta espectral de la cámara de color LT225c	46
<i>Figura 3.4 Arreglo experimental para medición de temperatura y espectro de color a) arreglo óptico, b) soplete de gas LP vista lateral con flama, c) boquilla del soplete, vista lateral, d) boquilla del soplete, vista superior. M1: Espejo esférico, F: Soplete de gas LP, GG: Vidrio Esmerilado, M2: Espejo plano, BS: Divisor de haz, C: Cámara digital a color, SF: Filtro espacial, L: Láser He-Ne.....</i>	50
Figura 3.5 Imagen instantánea del experimento, a) Imagen a colores, b) Imagen del canal rojo, c) Imagen del canal verde, d) Imagen del canal azul.	53
Figura 3.6 Imagen instantánea de moteado con el campo de vectores sobrepuesto para el caso 6 ($\Phi=1.21$).	54
Figura 3.7 Los campos de temperatura promedio calculados para cada caso, comenzando por la parte superior izquierda y luego a la derecha.	55
Figura 3.8 Comparación de los perfiles de temperatura calculados contra la medición por termopar para cada caso.	56
Figura 3.9 Espectro de color de la flama premezclada para cada caso sometido a análisis. Las imágenes superiores (a), no están corregidas contra “crosstalk”. Las de la parte inferior se encuentran ya corregidas (b).	57
Figura 3.10 Espectro de color de las imágenes de la flama premezclada después de aplicar el algoritmo de la subsección 3.10.	58
Figura 3.11 Intensidad promedio normalizada para los canales azul y verde. La normalización fue realizada con el valor máximo de intensidad del canal verde.	59
Figura 4.1 Perfiles del espectro de color de la flama para un valor de altura igual al pixel 100.	66
Figura 4.2 Aplicación del filtro iterativo de la EDP de cuarto orden.	67

Figura 4.3 Comparativa entre los resultados obtenidos por la EDP de cuarto orden (rojo) y el ajuste por base Gaussiana (azul)..... 68

Figura 4.4 Transformada de Abel del canal verde para los 6 casos experimentales. 69

Figura 4.5 Transformada de Abel del canal azul para los 6 casos experimentales. 70

Figura 4.6 Volúmenes de visualización obtenidos de la función matemática calculada por la base gaussiana. 71

Tablas

Tabla 2 Ecuaciones descriptivas de cada uno de los sistemas de desplazamiento láser de moteado. 25

Tabla 3 Relación de variables de la tabla 2. 26

Tabla 4 Constante de Gladstone-Dale para el aire a diferentes Longitudes de onda (λ). 28

Tabla 5 Gas LP condiciones experimentales..... 52

Nomenclatura

K	Kelvin
W	Watt
M	Metro
°C	Grado Centígrado
Mm	Milímetro
$I_{(n,m)}^{f_{rgb}}$	Imagen deformada a color
$I_{(n,m)}^{0_{rgb}}$	Imagen de referencia a color
I_R	Imagen de referencia
I_{obj}	Imagen deformada
$\alpha(y)$	ángulo del rayo
ϵ_y	Desplazamiento aparente en el plano imagen
ξ	Distancia entre vidrio esmerilado y plano imagen.
L	Tamaño del objeto
P	Densidad del objeto de fase (flama)
n_∞	Índice de refracción del medio
K	Constante de Gladstone-Dale.
M_s	Relación distancias $\frac{q}{p}$

M_i	Magnificación de la lente formadora de imagen.
$n(r)$	Índice de refracción en la coordenada Radial.
S_o	Tamaño de la mota objetivo
S_s	tamaño de la mota subjetivo
M	magnificación de la mota
$F, f_{\#}$	Número f
Λ	Longitud de onda del láser
K	Constante de Gladstone-Dale
\vec{r}	Vector de posición de un punto en el haz de luz
∇n	Gradiente del índice de refracción
$\frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial respecto a x
$\frac{\partial}{\partial y}$	Derivada parcial respecto a y
$\frac{\partial}{\partial z}$	Derivada parcial respecto a z
\int_{z1}^{z2}	Integral de trayectoria entre dos puntos
$\langle \rangle$	Promedio
Δz	Profundidad de foco
M	Magnificación del sistema
X_i	Posición Inicial Plano imagen
X_f	Posición final Plano imagen
x_i	Posición Inicial Plano objeto
x_f	Posición final Plano objeto
ΔX	Desplazamiento resultante Plano Imagen
D_i	distancia de plano imagen
D_o	distancia plano objeto
ϵ	Error de perspectiva
S	Distancia entre lentes
D	Distancia entre Sensores
MW_A	peso molecular del aire
MW_F	peso molecular del combustible
Est	Valor Estequiométrico

S_L	Velocidad de la flama
V_u	vector de velocidad del flujo de combustible.
Φ	Razón de equivalencia
CH^*	Radical Metano
C_2^*	Radical Dióxido de Carbono
w_i	Peso de la componente Gaussiana i – ésima
$z(r)$	Función a Ajustar
$R(r, z)$	Perfil Transversal de emisión
$P(x, z)$	Región proyectada en el plano de observación.

Abreviaciones

FLMD	Fotografía de Láser de Moteado Digital
TF	Transformada de Fourier
ITF	Inversa de la Transformada de Fourier
CCD	Dispositivo de carga acoplada
BOS	Background Oriented Schlieren
SVD	Single Value Decomposition

Capítulo 1 Técnicas para la medición de temperatura y color espectral en flamas

En la actualidad debido a los avances tecnológicos y la continua mejora de dispositivos, se puede considerar de importancia la obtención de mediciones para realizar pruebas de confiabilidad a aparatos de índole industrial. Una de las principales desventajas en cuanto al uso de técnicas puntuales para la caracterización de equipos [1-3], es que éstas no generan un resultado de campo completo del fenómeno de estudio, lo cual en ocasiones no aporta la información necesaria para la obtención de resultados finales.

Dada esta situación existen diversas técnicas ópticas para la medición de flujo de fluidos, que además no se limitan sólo a la presentación ya de un campo de flujo en dos dimensiones, sino que se han extendido hasta tres. Esto aunado al auge del uso de las cámaras de color ha contribuido a la exploración de medir variables adicionales como lo son los radicales liberados durante el proceso de combustión.

Para comenzar podemos decir que cualquier cuerpo caliente en contacto con el aire, generará un fenómeno de transferencia de calor con el entorno, esto derivado de la diferencia de temperaturas existente entre el contorno del objeto y el medio, lo cual como consecuencia generará una diferencia de densidades y por lo tanto existirá un cambio inherente en los valores del índice de refracción. Estas pequeñas fluctuaciones se pueden medir con el uso de técnicas ópticas como son: Mapeo de deflexión por fotografía de moteado [4], método de la rejilla fuera de foco, Schlieren de fondo orientado (BOS), Schlieren de color, por mencionar algunos [6-25], éstos se fundamentan en la medición de la deflexión angular generada en el esquema de trazo de rayos como consecuencia de los cambios de las fluctuaciones de los gradientes del índice de refracción, los cuales como se comentó tienen que ver de forma natural con la temperatura de la flama, lo cual se fundamenta con la relación de Gladstone-Dale.

En particular las técnicas que usan el concepto de desplazamiento de moteado y con amplia aplicación en el área de flujo de fluidos son el mapeo de deflexión por fotografía de moteado y BOS. En una primera instancia en 1972 Köpf [9] y Debrus [10], descubren que al colocar un difusor (vidrio esmerilado) detrás de un objeto de fase o delante del mismo, y utilizar una técnica de doble exposición, las motas generadas por el efecto de esparcimiento de la luz sobre la superficie rugosa generan un desplazamiento aparente debido a las variaciones de índice de refracción como consecuencia del posicionamiento del objeto de fase, en una primera instancia estos desplazamientos se procesaban para obtener franjas, las cuáles contenían información del objeto. Por su parte autores como Guo [26], profundizaron en diferentes configuraciones ópticas y en el modelado matemático de éstas, obteniendo relaciones directas entre índice de refracción, temperatura y densidad, señalando claramente su aplicación en fenómenos de transferencia de calor, adicionalmente de la medición de desplazamiento y el estudio de la temperatura en una placa caliente a diferentes distancias.

Debido al auge de los ordenadores y la mejora del diseño de las componentes ópticas, se han propuesto mejoras plausibles a los arreglos que usan el fundamento del desplazamiento de moteado como BOS, tal es el caso del estudio realizado por Meier [27], en el cual propone el uso de un sistema de iluminación por láser para la generación del patrón de moteado de fondo, demostrando la mejora en los resultados obtenidos al realizar la medición contra un fondo sintético generado por ordenador, además de un estudio del efecto del número $#F$ y el contraste de la imagen en las mediciones, los cuales concuerdan aparentemente con la teoría de velocimetría de partículas (PIV, por sus siglas en inglés). Curiosamente y debido a la semejanza del moteado con las partículas utilizadas en PIV se pueden utilizar técnicas de correlación para el procesamiento, además de las ecuaciones de estereoscopía para el análisis de 3D, como las presentadas en el trabajo de Stella [28].

Para la obtención de campos en 3D algunas técnicas se enfocan en el estudio de flamas axisimétricas y el principio de deconvolución de la transformada de Abel, trabajos como el presentado por Walsh [29], en donde se parte de las ecuaciones de la técnica de mapeo de deflexión por fotografía de moteado y que debido a la bondad del tipo de flujo se obtiene el campo en 3D, contrastando con trabajos como el presentado por Krothapalli [30], en el cual

la región de análisis es un jet cuadrado y que los resultados tridimensionales son obtenidos por un arreglo tipo estereoscópico de mayor complejidad.

Debido al gran impacto de la transformada de Abel para el estudio de flamas axisimétricas, han existido una diversidad de trabajos que han buscado optimizar la solución de esta integral por distintos métodos numéricos [31-36], entre los destacables podemos mencionar el método de Vest [35] aplicado al procesamiento de franjas obtenidas de un interferómetro y que propone la división de la matriz de datos en segmentos anillados para realizar la deconvolución, por su parte otros autores como Miranda [32], sugiere el uso de una base gaussiana en el proceso de la resolución de la transformada inversa de Abel. En el caso de desplazamiento de moteado el método de Fomin [36] destaca por su simplicidad y fácil implementación programática, siendo este el utilizado para este trabajo y del cual se profundizará a mayor detalle en el capítulo 2.

Por otra parte, en cuanto a aplicaciones podemos destacar trabajos como el de Fujisawa [37], el cual realiza el estudio de temperatura al usar como combustible hidrógeno. Singh [25], que realiza una comparativa entre métodos: Fotografía de moteado e Interferometría de Talbot.

Dada la naturaleza del fenómeno de combustión en el caso de flamas, existe la necesidad de estudiar las emisiones generadas por ésta. En este apartado existen también una diversidad de técnicas ópticas para la identificación de los radicales generados, destacando principalmente por su naturaleza no invasiva, además de relacionar parámetros adicionales como razón de flujo o caudal y la razón equivalente Φ (relación entre combustible y aire). Técnicas como la Raman [38], que usa la interacción de la luz con la materia para obtener información sobre la composición o características del objeto de fase y es que es usada en el ámbito de la combustión, muy en particular para la detección de las especies químicas resultantes del proceso, tales como, metano CH_4 y propano C_3H_8 , las cuáles son de amplio interés en el proceso de combustión sirviendo como indicador de la eficiencia de la misma. El método consiste en un haz de luz monocromático, el cual se hace incidir a través de la muestra analizada, en este caso la región de combustión de la flama, en este punto la flama es tan delgada que se puede considerar como unidimensional, al emerger existirá un cambio

medible en la frecuencia del haz de luz, éste será llevado para su comparación contra un haz de referencia en el espectrómetro, pudiendo obtener las mediciones deseadas.

Existen otros enfoques como son la teoría de radiación de cuerpo negro [38], con lo cual, agregando una serie de filtros a 420 nm, 430 nm para la detección de CH y 440 nm para comparar la efectividad de la combinación de diferentes filtros, un filtro de interferencia cuando es puesto entre un detector y una fuente térmica que irradia, transmite solo una pequeña porción del espectro de emisión de la fuente. La intensidad transmitida, puede ser calculada por convolución entre la curva de transmisión del filtro y la de emisión de la fuente. Sin embargo, estos arreglos necesitan de una gran cantidad de componentes ópticas, lo cual influye directamente en su costo.

Una flama incluso en su más simple composición y condición de flujo, libera varios elementos químicos que tienen su espectro de emisión característico. Estos radicales se encuentran perfectamente bien definidos a lo largo del espectro electromagnético para su posible identificación.

Como una consecuencia natural de esto el color que percibimos de las flamas proviene de su emisividad en las longitudes de onda visibles. Para flamas constituidas por hidrocarburos, se pueden atribuir dos radicales principales como lo son el CH^* (430 nm) y el C_2^* (516 nm).

La intensidad liberada, por ende, tiene que ver con factores cualitativos como son la eficiencia de combustión, composición del combustible y la **razón equivalente** Φ (véase capítulo 3), (relación combustible-oxidante).

Debido al auge tecnológico y el abaratamiento de las tecnologías, además de la constante innovación en algoritmos para procesamiento de imágenes, se ha vuelto factible el uso de los sensores CCD, para la adquisición de datos de flujo de fluidos con ciertas características, que además de sus radicales como se mencionó anteriormente, cuentan con líneas espectrales perfectamente bien definidas, y que coinciden con la construcción de los CCD en cuanto a las tres principales componentes de color, conocidas como el triplete RGB; dejando como consecuencia la posibilidad de relacionar estas señales digitales con evaluaciones del fenómeno de combustión [38-41]. En estos trabajos destacan las

contribuciones realizadas por Huang y Yang [39, 40]. En ambos es necesario realizar una calibración del espectro detectable de la cámara de color, debido a la naturaleza de construcción de los sensores existe un efecto no deseado conocido como crosstalk, que consiste en un empalme de los espectros del dispositivo CCD, lo cual conlleva a contaminar con ligeras perturbaciones al canal vecino. En algunos trabajos se han realizado correcciones del mismo por medio de métodos algebraicos [40, 42].

Dado que se trabaja con señales digitales y regiones delimitadas por el sensor CCD, existe de forma natural la presencia de ruido o de información innecesaria, en algunos trabajos [43] se opta por un procesamiento de imágenes previo al postprocesamiento de datos, llevándose a cabo por medio de una conversión del triplete RGB al espacio HSV, consiguiendo un mayor detalle en los canales azul y verde que contienen información de los radicales bajo estudio.

Otros como Lundenberg [43], propone la generación de un algoritmo iterativo para la eliminación del ruido de fondo, con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos por el sensor de la cámara y eliminando el “background” que no contiene información alguna de la flama.

Como se puede intuir todas estas técnicas son no invasivas, pero proporcionan únicamente una medición de temperatura o quimioluminiscencia, al momento de realizar el trabajo experimental, el principal objetivo de este trabajo doctoral es utilizar la técnica de fotografía de moteado y hacer uso de una cámara de color para la obtención de información de quimioluminiscencia y temperatura de la flama. Obteniendo dos mediciones de manera simultánea, además de información adicional como contornos y alturas, que de alguna manera proporcionan información acerca de la eficiencia de combustión.

En el capítulo 2 se profundiza acerca del enfoque de la fotografía de moteado para la medición de temperatura, los pormenores del efecto de moteado al irradiar una superficie rugosa como son el tamaño de la mota que debe cumplir con el criterio de Nyquist para poder detectarse desplazamiento de manera objetiva, las ecuaciones de la deflexión del rayo aplicadas a flujos axisimétricos y la respectiva caracterización de 3 objetos de fase distintos una vela de parafina, un soplete de gas LP y una resistencia eléctrica cilíndrica de ½ pulgada

de diámetro, lo último teniendo como objetivo la caracterización del sistema, valores de error y los límites de medición inferior y superior.

El capítulo 3 discute acerca de los pormenores de la medición de radicales y la modificación realizada al arreglo de fotografía de moteado para analizar los dos fenómenos de manera simultánea, adicional se proporciona toda la metodología experimental y de procesamiento computacional para la eliminación de ruido de fondo y del efecto de “crosstalk”, para su posterior análisis estadístico en cuanto a la obtención de la relación de radicales contra la razón de equivalencia Φ .

Cabe destacar que al momento de la escritura de esta tesis se obtuvieron resultados viables para buscar la publicación de un segundo artículo, en el capítulo 4 se trata la problemática del ruido inherente generando por el arreglo de fotografía de moteado, el cual es eliminado utilizando una Ecuación Diferencial Parcial (EDP) de cuarto orden, y eliminando el efecto residual de escalonado al utilizar un ajuste de curvas por medio de una base gaussiana, lo cual proporciona resultados con una mejora visual drástica en el apartado de quimioluminiscencia.

Por último, el capítulo 5 habla sobre las conclusiones de este trabajo doctoral y sobre la posibilidad en cuanto a trabajo a futuro.

Referencias

- [1] Gaydon, A. G., Wolfhard, H.G. Flames. (1960). Flames. Their Structure Radiation and Temperature. New York: The Macmillan Company
- [2] Fristrom, R. (1995). Flame Structure and Processes. Oxford University Press, pp.115.
- [3] Kenneth, K. Stephen R., Stone R., Oldfield, M. and Ferench. (2003). Instantaneous Exhaust Temperature Measurements Using Thermocouple Compensation Techniques. SAE International.
- [4] Archibold, E., Burch, J.M. and Ennos A.E. (1970). Recording of in-plane displacement by double-exposure speckle photography. Optica Acta, 17:883-898.
- [5] Warren, R. (1994). Design of Thermocouple Probes for Measurement of Rocket Exhaust Plume Temperatures. Australia: Commonwealth of Australia.
- [6] Born, M. and Wolf, E. (1999). Principles of Optics, 7th edition, Cambridge University Press.
- [7] Wolfgang, M. (1987). Flow Visualization (second edition ed.). Academic Press, Inc.
- [8] VASILE'EV, LA. (1971) Schlieren Methods, Israel Program for Scientific Translations Ltd, pp 69

- [9] U. K. (1972). Application of speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects. *Opt. Comm.* 5, p. 347.
- [10] Debrus, S. (1972). Groundglass Differential Interferometer. *Appl. Opt.* Vol. 11, pp 853-857.
- [11] Jamin. (1856). Neuer interferential-refractor. *Ann. Phys. Chem.* 174(6), 345–349
- [12] Kafri, O. and Glatt, I. (1990). *The Physics of Moiré Metrology*. A Wiley-Interscience Publication.
- [13] Ostroumov, G. (1950). *Doklady AN SSSR*. 81, No. 5 887.
- [14] Herrera, CA. (2009). *Medición de temperatura y análisis en flujos de fluido transparentes utilizando la técnica de Schlieren*. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., León, Guanajuato.
- [15] Meyer-Arendt, JR. (1992). *Selected Papers Schlieren Optics*. Editor, General Editor Milestone Series, Brian J. Thomson, Spie Milestone Series Volume Ms 61.1992.
- [16] Hook, R. (1665). Of a new property in the air. *Micrographia observation LVIII*, 217-219, London.
- [17] Foucault, L. (1859). Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté. *Annales de l'Observatoire Imperial de Paris* 5, 197-237.
- [18] Toepler, A. (1864). *Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode*. Maximilian Cohen und Sohn, Bonn.
- [19] Huygens, Ch. (1901). *Ouvres Complètes*, 13, 172-173 (Nijhoff, La Haye).
- [20] Harald, P., Fuchs, H., Winklhofer, E. and Pretzler, G. (1993). Flame diagnostics by light sheet imaging and by shearing interferometry. *Optical Engineering*, 32(5), pp.1025-1032.
- [21] Mach E. and Sommer, J. (1877). Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von explosionschallwellen. *Sitzungsb. D. k. Acad. D. Wiss.Math. Naturw. Cl. Wien*, 75:101-130.
- [22] Prandtl, L. (1907). Neue Untersuchung über die strömende Bewegung der Gase und Dämpfe. *Physicalische Zeitschrift*. 8(1): 23-30.
- [23] Schardin, HC. Cranz. (1938). Chapter 1 of *Beiträge zur Ballistik and technischen Physic*. ed. H. Schardin. J. A. Barth, Leipzig, pp. 1-8.
- [24] Mach, E. and Weltrubsky, J. von. (1878). Über die Formen der Funkenwellen. *Sitzungsber. kaiserl. Akad. Wiss Wien, Math-Naturwiss. Kl. Abt. 1* 78, 551-560.
- [25] Singh, P., Shakher, C. (2003). Measurement of the temperature of a gaseous flame using a shearing plate. *Opt. Eng.* 42(1) pp.80–85
- [26] Guo, ZY., and Song, YZ. (1993). Laser speckle photography for heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7(2), 128.
- [27] Meier, AH., and Roesgen, T. (2013). Improved background oriented schlieren imaging using laser speckle illumination. *Experiments in Fluids*, 54(6).
- [28] Stella, A., Guj, G., Kompenhans, J., Richard, H., and Raffel, M. (2001). Three-components Particle Image Velocimetry measurements in premixed flames. *Aerospace Science and Technology*. 5(5), 357–364.
- [29] Walsh, TE. and Kihm, KD. (1995). Tomographic deconvolution or laser speckle photography for axisymmetric flame temperature measurement. *J. of Flow Vis. and image process.*; vol. 2: 299-310.

- [30] Krothapalli, A., Baganoff, D., & Karamcheti, K. (1980). Development and Structure of a Rectangular Jet in a Multiple Jet Configuration. *AIAA Journal*, 18(8), 945–950.
- [31] Daun, KJ., Thomson, K. A., Liu, F., & Smallwood, G. J. (2006). Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization. *Applied Optics*, 45(19), 4638.
- [32] González-Ramírez, E., de la Rosa Miranda, E., Arceo-Olague, J. G., Villa-Hernández, J. J., de la Rosa Vargas, I., Saucedo Anaya, T., Araiza-Esquivel, M. A. (2013). Abel transform inversion using Kalman filter. 8th Iberoamerican Optics Meetin
- [33] g and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications.
- [34] Dribinski, A., Mandelshtam, V. and Reisler, Hanna. (2002). Reconstruction of Abel-transformable images: The Gaussian basis-set expansion Abel transform method. *Review of Scientific Instruments*. 73.
- [35] Chang, L., Lijun, X., Zhang, C., and Fangyan, Li. (2014). One-dimensional tomography of axisymmetric temperature distribution with limited TDLAS data by using three-point Abel deconvolution. *IST 2014 - 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Proceedings*. 432-435.
- [36] Vest, CM. (1979). *Holographic Interferometry*. John Wiley, New York.
- [37] Fomin, NA. (1998). *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*. Germany: Springer,.
- [38] Fujisawa, N., Aiura, S., Ohkubo, M. and Shimizu, T. (2009). Temperature Measurement of Dilute Hydrogen Flame by Digital Laser-Speckle Technique. *J of Vis.* 12 (1):57-64.
- [39] Bechtel, JH. Blint, RJ., Dasch, CJ., Weinberger, DA. (1981). Atmospheric pressure premixed hydrocarbon-air flames: Theory and experiment. *Combust. and flame*. 42:197-213.
- [40] Huang, HW., Zhang Y. (2011). Digital colour image processing, based measurement of premixed CH₄ + air and C₂H₄ + air flame chemiluminescence. *Fuel*. 90:48–53.
- [41] Yang, J. Mab, Z., Zhang, Y. (2019). Improved colour-modelled CH* and C₂* measurement using a digital colour camera. *Meas.* 141:235–240.
- [42] Huang, HW., Zhang, Y. (2008). Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing. *Meas. Sci Technol.* 19.
- [43] Caspi, D. Kiryati, N., and Shamir, J. (1998). Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Transactions on Pattern Anal. and Mach. Intell.* 20(5):470-480.
- [44] Using Image Processing for Flame Diagnostics: Lundberg, J., Henriksen, M., Gaathaug, A. The 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58) 2017, 25-27 Sep 2017, Reykjavik. Iceland: Proc. of the 58th SIMS; 2017. p.168-173.

Capítulo 2 Fotografía de moteado láser digital para medir campos de temperatura

La medición de campos de temperatura es un tópico importante en distintas áreas de la ciencia y la ingeniería. En general, las técnicas de campo completo son preferibles a las puntuales puesto que ofrecen múltiples ventajas. Como por ejemplo la obtención de mapas de contorno, perfiles de la flama para distintas distancias, además de que en cuanto a lo técnico su simple montaje y repetibilidad.

Para medir temperatura, estas técnicas se basan en el cambio que ocurre en el índice de refracción debido al objeto de fase (para nuestro caso una flama). En este capítulo se presenta la técnica de Fotografía de Moteado Laser Digital (FMLD) para medir la temperatura en flujos de fluidos. Este sistema óptico tiene la principal ventaja de no requerir un excesivo número de componente ópticas, además de su simplicidad en la implementación. En este capítulo se describirá el fenómeno de moteado, los principales arreglos ópticos utilizados para medir desplazamiento usando fotografía de moteado, y su aplicación en la medición experimental de campos de temperatura en flujos de fluidos. Por otro lado, para obtener mediciones confiables es necesario la correcta caracterización del instrumento que se utiliza para tal fin. Por tanto, este capítulo se enfoca en la determinación de los límites de medición de temperatura usando FMLD.

2.1 El fenómeno de moteado

Cuando una superficie rugosa es iluminada por una fuente de luz de tipo coherente se produce una distribución de granos aleatoria, este fenómeno es conocido como un patrón de moteado (patrón de moteado figura 2.1). Es necesario también que esta superficie cumpla con una rugosidad de al menos una distancia igual a la longitud de onda de la fuente de iluminación.

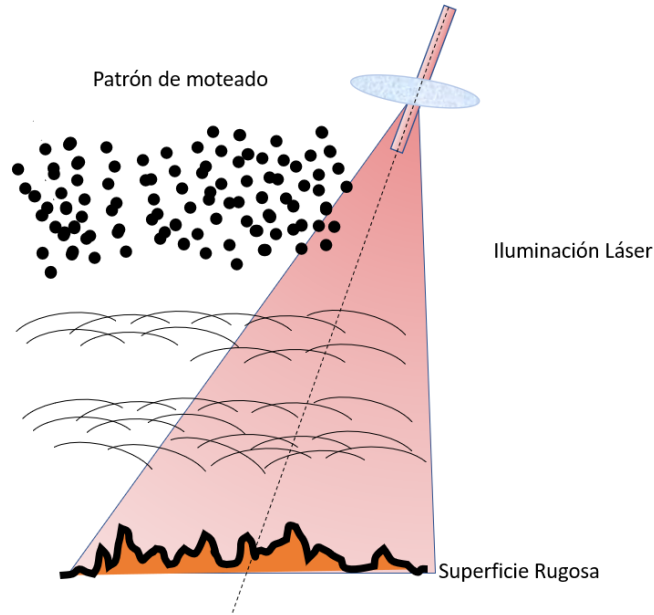


Figura 2.1 Generación de un patrón de motas como consecuencia del fenómeno de interferencia.

A lo largo de este trabajo se utilizará el término “moteado” para referirse a éstos. La presencia de esta distribución con manchas de tonos blanco y negro es completamente aleatoria, y es descrita por medio del fenómeno de camino aleatorio Dainty-Goodman [1], explica de manera puntual y detallada la suma fasorial de las ‘N’ contribuciones fasoriales en cada uno de los puntos del plano (x,y,z). Como paso subsecuente se aplica una transformación de variables aleatorias clásica aplicando el Jacobiano para obtener la distribución de densidad probabilística, dando como resultado final la ecuación (2.1).

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) es una exponencial decreciente, donde $\langle I \rangle$, denota la intensidad promedio del patrón de moteado. Esta situación permite que el patrón de moteado pueda verse normalizado. Se puede medir el contraste del patrón de moteado [1], por medio de la razón siguiente:

$$c = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (2.2)$$

Donde σ corresponde a la desviación estándar del patrón de moteado, e $\langle I \rangle$ es la intensidad promedio del mismo. Con lo cual se concluye que el contraste en un patrón de moteado generado con luz polarizada siempre será la unidad.

En un principio existen dos tipos de observación básicos del fenómeno, conocidos como moteado subjetivo y objetivo.

2.1.1 Moteado objetivo

En la figura 2.2, se puede observar un arreglo simple de moteado objetivo. La imagen consiste en lo siguiente: Una fuente de iluminación (I) irradia la superficie rugosa generando que los frentes de onda se reflejen y en la trayectoria hacia la pantalla generen interferencia, esto como consecuencia genera un patrón de moteado a lo largo de una región delimitada por un diámetro (D) en el dispositivo de observación (pantalla o cámara), el cual se encuentra a una distancia (L).

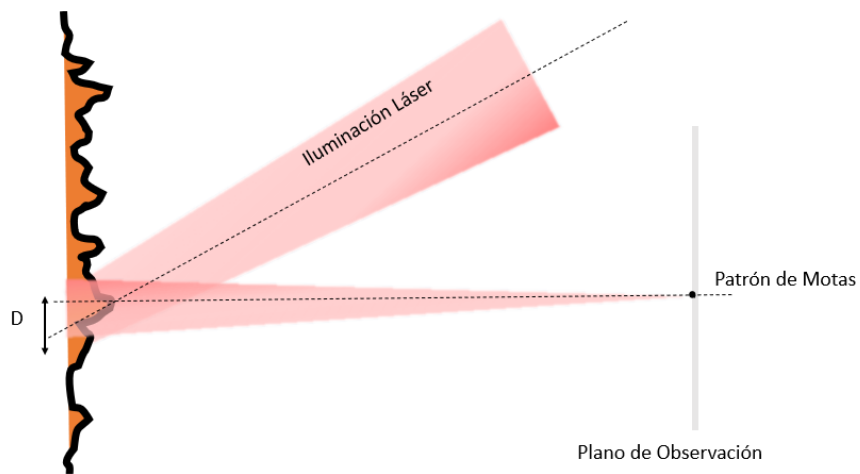


Figura 2.2 Arreglo simple de moteado objetivo.

Para este caso el tamaño de las motas vendrá dado por la ecuación (2.3) [2]

$$S_o \geq 1.2\lambda \frac{L}{D} \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3), está vinculada siempre con el ángulo de apertura subtendido por la fuente de iluminación en el plano de observación del patrón de moteado. Dónde λ es la longitud de onda de la fuente de iluminación, D el diámetro del haz en la superficie y L es la distancia entre la superficie del objeto y el plano imagen.

2.1.2 Moteado subjetivo

En este arreglo al contrario que en el caso objetivo ya se cuenta con un sistema formador de imagen, éste es colocado entre la superficie rugosa y el plano de captura u observación (plano imagen). Como se muestra en la figura 2.3, de nuevo una fuente de iluminación incide sobre una superficie rugosa, reflejando los frentes de onda hacia la dirección de la lente generando el ya conocido patrón de moteado.

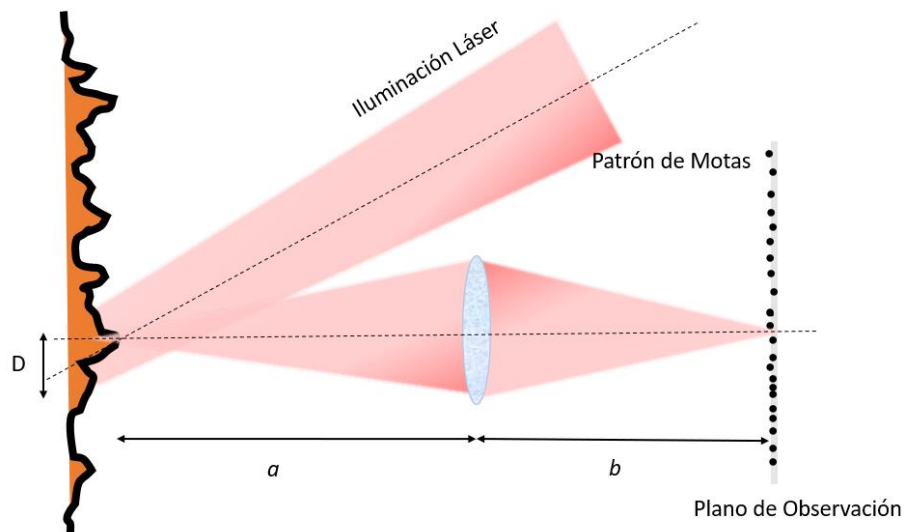


Figura 2.3 Moteado subjetivo.

La lente se encargará de formar ese patrón de moteado para que pueda ser visible o capturado por una cámara. Cabe destacar que este moteado tendrá una amplificación dependiente de la lente limitando el área de visión del objeto.

Para este caso tendremos que el tamaño de la mota estará definido como:

$$S_s \geq 1.2\lambda \frac{b}{D} \quad (2.4)$$

Donde, además

$$m = \frac{b - f}{f} \quad (2.5)$$

$$F = \frac{f}{a} \quad (2.6)$$

Siendo la ecuación (2.6) conocida como la apertura numérica. Sustituyendo (2.4) y (2.5) tenemos que el tamaño del moteado subjetivo puede ser descrito como:

$$S_s = 1.2(1 + m)\lambda F \quad (2.7)$$

Donde tenemos que λ de nuevo corresponde a la longitud de onda de la fuente de iluminación, F la apertura numérica, m la magnificación de la lente, b la distancia entre la superficie y la lente y D el diámetro del haz en la superficie del objeto.

En esta última ecuación es claramente observable una relación intrínseca entre el número F y la magnificación de la lente en la determinación del tamaño de la mota, de acuerdo a la ecuación (2.7), se observa que un aumento de la amplificación o el número F , conllevará a un incremento en el diámetro del moteado, y en base a lo observado durante este trabajo, es más fácil manipular este último para disminuir o aumentar el diámetro de la mota.

2.2 Sistemas de medición

Además de los dos sistemas ópticos mencionados para la generación de moteado objetivo y subjetivo, existen otro tipo de configuraciones dependiendo el objeto de fase a medir. A continuación, en los próximos apartados se describirán cada una de estas configuraciones.

2.2.1 Sistema de medición (A)

Para esta variante no existe sistema formador de imagen, además de que ya se considera una distancia entre el vidrio esmerilado y el sistema de captura. Algunas de las ventajas de esto, es que si el objeto genera una iluminación elevada parte de ella puede ser absorbida por el vidrio, siendo otra consideración que los desplazamientos únicamente dependen del efecto Schlieren y no se ven perjudicados por el efecto de sombras, consecuentemente sin importar si el índice de refracción varía en la dirección del rayo. Permitiendo también la medición de grandes campos de índice de refracción o secciones de

objeto grandes. Aquí la desventaja es que debido a la eliminación de las sombras no se puede definir los bordes de la sección de análisis.

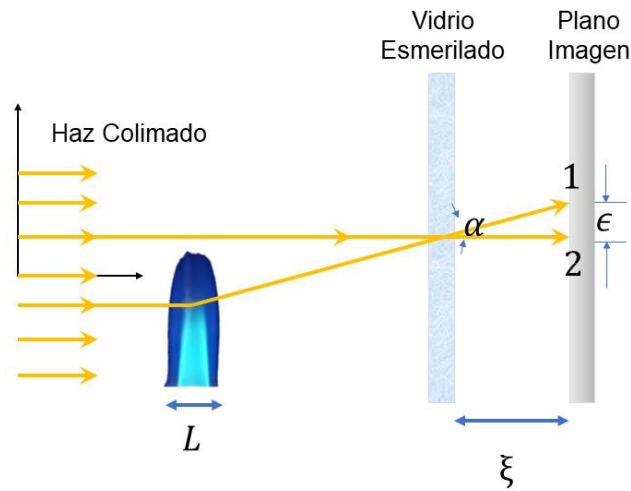


Figura 2.4 Sistema de medición tipo (A).

2.2.2 Sistema de medición (C)

Este sistema es una variante de moteado Schlieren-objetivo (figura 2.5 sistema tipo (c), para esta configuración el filo de la navaja se ve sustituido por el vidrio esmerilado, lo cual conlleva a una medición más sensible de la variación de los gradientes de índice de refracción como en cualquier sistema Schlieren.

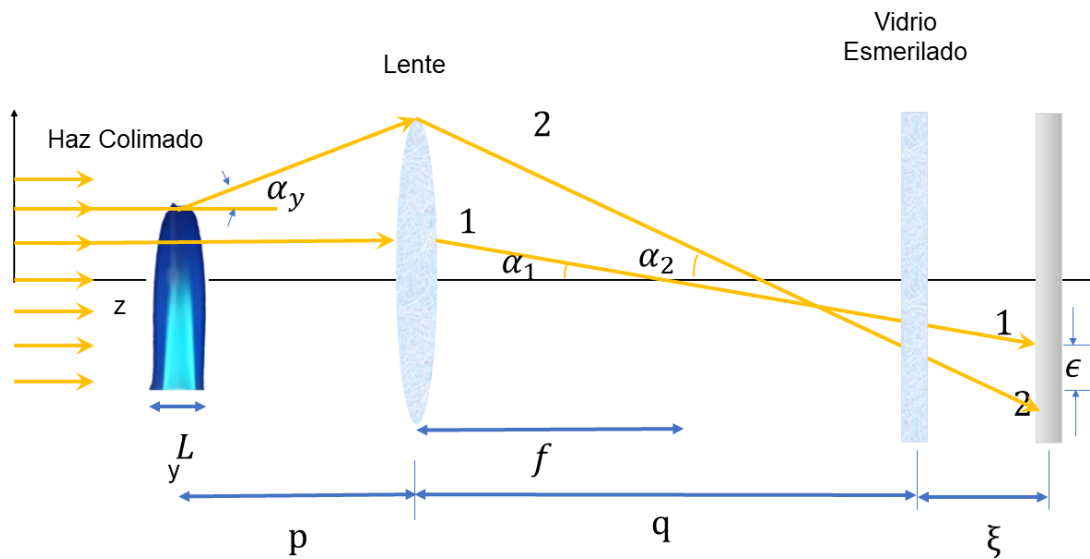


Figura 2.5 Sistema tipo (C).

2.2.3 Sistema de medición (D)

Muy similar al sistema (C), con la variante de que los desplazamientos son medidos en el plano de desenfoco, usando una lente formadora de imagen.

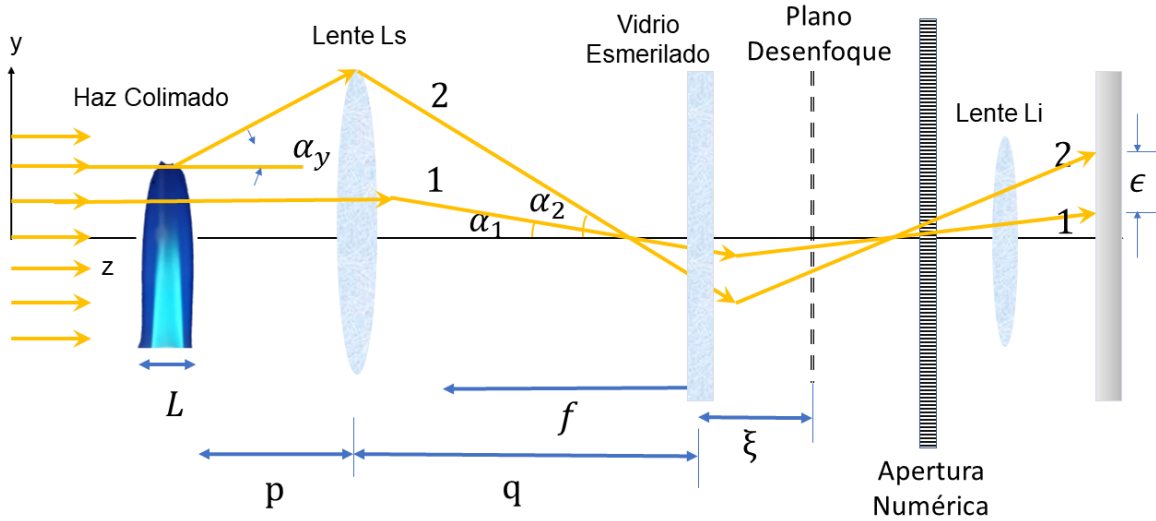


Figura 2.6 Sistema tipo (D).

A continuación, en la siguiente tabla se realiza el compendio de las relaciones matemáticas de cada arreglo presentadas en el trabajo de Guo [3].

Tabla 1 Ecuaciones descriptivas de cada uno de los sistemas de desplazamiento láser de moteado.

Sistema de medición	$\alpha_y = f_1(\epsilon_y)$	$\frac{\partial n}{\partial y} = f_2(\epsilon_y)$	$\frac{\partial \rho}{\partial y} = f_3(\epsilon_y)$
A	$\alpha_y = \frac{\epsilon_y}{\xi}$	$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi}$	$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{1}{K} \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi}$
B	$\alpha_y = \frac{\epsilon_y}{\xi} \frac{1}{M_i}$	$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi} \frac{1}{M_i}$	$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{1}{K} \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi} \frac{1}{M_i}$
C	$\alpha_y = \frac{\epsilon_y}{\xi} M_s$	$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi} M_s$	$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{1}{K} \frac{\epsilon_y n_\infty}{L \xi} M_s$
D	$\alpha_y = \frac{\epsilon_y M_s}{\xi} \frac{1}{M_i}$	$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{\epsilon_y n_\infty M_s}{L \xi} \frac{1}{M_i}$	$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{1}{K} \frac{\epsilon_y n_\infty M_s}{L \xi} \frac{1}{M_i}$

Tabla 2 Relación de variables de la tabla 2.

Variable	Descripción	Variable	Descripción
α_y	Desviación del rayo.	n	Índice de refracción.
ε_y	Desplazamiento aparente en el eje y.	n_∞	Índice de refracción del medio.
ξ	Distancia entre vidrio esmerilado y plano imagen.	K	Constante de Gladstone -Dale.
L	Tamaño del objeto.	M_s	Relación distancias $\frac{q}{p}$.
ρ	Densidad del objeto de fase (flama).	M_i	Magnificación de la lente formadora de imagen.

2.3 Algunas consideraciones para tomar en cuenta en la medición de temperatura

Como se mencionó previamente, uno de los factores importantes a considerar es el contraste existente entre una mancha brillante y una oscura. Además, la densidad de las mismas es contundente al momento de implementar algoritmos de correlación para el análisis de desplazamientos, los cuales son generadas cuando se implementan estas técnicas en el estudio de objetos de fase (elementos mecánicos, flamas, formas, etc.). Por tanto, en los siguientes puntos se enumeran consideraciones importantes.

- **Alto contraste:** Debe existir una distinción bastante clara entre motas brillantes y oscuros.
- **Distribución al 50%:** Es deseable que exista un balance entre las motas brillantes y oscuras, en una distribución ideal esta relación debe ser 1:1
- **Consistencia en tamaño:** Es deseable que se cumpla con el criterio de muestreo, conocido como criterio de Nyquist. Una mota debe ocupar al menos dos píxeles. Aunque en la actualidad existen estudios referentes a precisión subpíxelica que señalan que esta relación puede disminuir un poco sin sacrificar precisión [4,5].

En la figura siguiente se pueden aclarar esos puntos

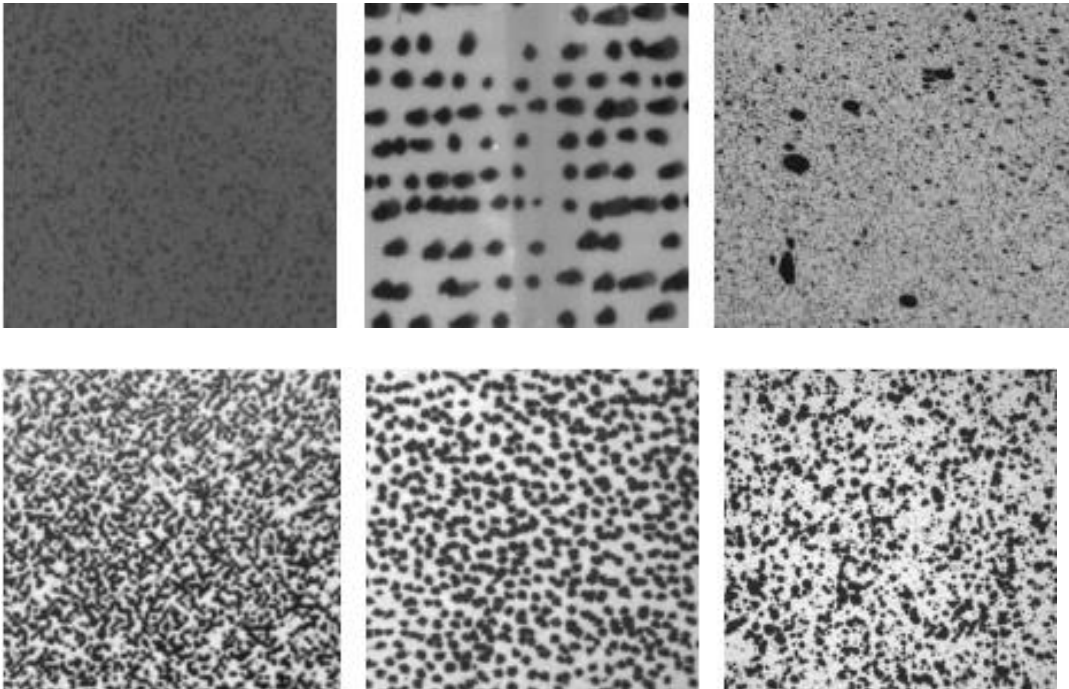


Figura 2.7 a) Poco contraste y baja densidad, b) excesivo de tamaño y poca densidad, c) Tamaño excesivo de algunos puntos, además de bajo contraste y distribución anormal, d) Patrón de motas deseable, e) Excesivo tamaño y poca densidad, f) No existe una densidad uniforme ni tamaño.

2.3.1 Análisis de imágenes usando la técnica de doble exposición

Para realizar la medición de un fenómeno por medio FLMD, se utiliza técnica de correlación cruzada. Por ende, es necesaria la obtención de dos patrones de captura en el sensor de la cámara, uno de ellos denominado como el patrón de referencia I_R y el otro como el patrón de desplazamiento I_{Obj} , el cual se obtiene con la presencia del objeto de fase al realizar la captura. Lo cual es observable en la figura 2.7. Para estas dos imágenes se procede a realizar una subdivisión de la imagen en secciones de menor tamaño, las cuales pueden ser seleccionadas por el usuario, generalmente las más utilizadas son 16×16 píxeles, 24×24 píxeles y 32×32 píxeles. Estas regiones son conocidas como *ventanas de interrogación*, esto es observable en la figura 2.8. Como se menciona en [6], Es importante tomar a consideración cual es la que mejor se adapta al fenómeno de estudio, puesto que una ventana de interrogación pequeña puede perder de vista los desplazamientos aparentes y una ventana excesivamente grande no detectarlos. Una vez que se define este punto, se procede realizar un análisis de correlación entre la ventana de interrogación de la imagen sin deformar (t) y la deformada ($t + \Delta t$), lo cual conlleva a realizar un análisis en el plano de Fourier (figura

2.8d) y determinar el desplazamiento aparente en pixeles entre el máximo del espectro de las imágenes I_R e I_{Obj} , estos valores se asignan a una nueva malla como el vector de desplazamiento de la región. Estas técnicas son utilizadas en el ámbito de Velocimetría de Partículas (*PIV, siglas en inglés*) [6-8], más sin embargo debido a la similitud entre las motas y una partícula, se pueden utilizar también en la técnica de FLMD.

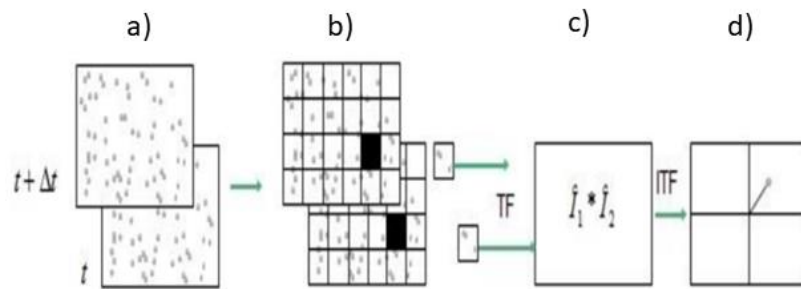


Figura 2.8 Diagrama simplificado del algoritmo de correlación cruzada a) Imágenes de referencia (t) y de objeto deformado ($t + \Delta t$), b) Selección de la misma región para la ventana de interrogación en las dos imágenes, c) Multiplicación de las dos imágenes en el plano de Fourier, d) Detección del desplazamiento del pico máximo.

2.4 Ecuación de Gladstone-Dale

Debido a que el método de FMLD mide la deflexión de los haces de luz, este cambio es proporcional al cambio del índice de refracción en presencia de flujo, el índice de refracción está relacionado intrínsecamente con el cambio de densidad por medio de la ecuación de Gladstone-Dale [8]. Esta relación está dada por la ecuación (2.8).

$$n - 1 = K\rho \quad (2.8)$$

Donde K depende de la naturaleza del gas y de la longitud de onda de la luz en el medio de propagación. En la Tabla 3, se muestran algunos valores de K para el aire iluminado para diferentes longitudes de onda.

Tabla 3 Constante de Gladstone-Dale para el aire a diferentes Longitudes de onda (λ).

$K(\text{cm}^3/\text{g})$	Longitud de Onda $\lambda(\mu\text{m})$
0.2239	0.9125
0.2250	0.7034
0.2259	0.6074

0.2250	0.5320
0.2274	0.5097
0.23	0.4079
0.2330	0.3562

De la tabla anterior, se obtiene que para un láser verde $\lambda = 538nm$ el valor promedio para la constante es de $K \cong 0.225 \frac{cm^3}{g}$.

2.5 Transformada de Abel

Considere un rayo de luz que se propaga en la dirección 'x' dentro de un índice de refracción axisimétrico, $n(x, y, z)$, el cual se muestra en la figura 2.11:

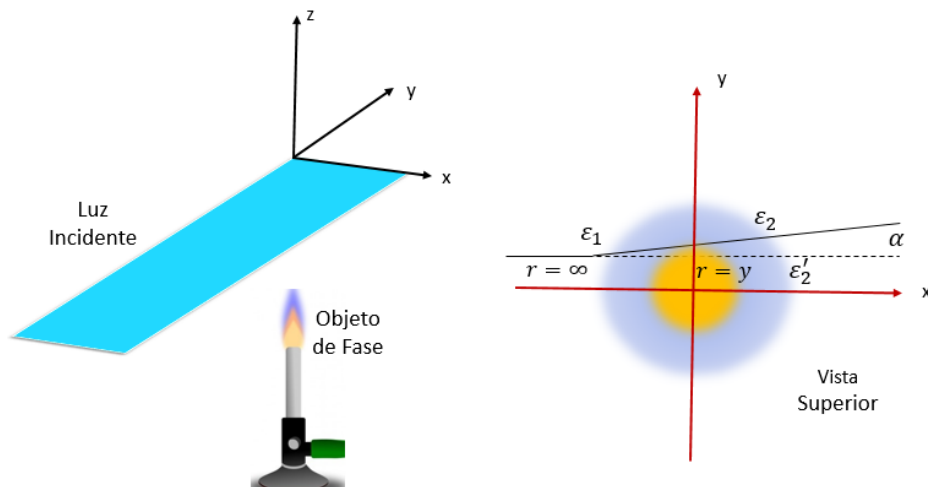


Figura 2.9 Desviación del rayo de luz por efecto de la variación del índice de refracción como consecuencia del objeto de fase.

La expresión matemática que relaciona el gradiente del índice de refracción en el espacio, es la ecuación de la *eikonal*, la cual se obtiene usando la ecuación de Helmholtz proponiendo una solución con dos variantes, una para la amplitud y una para el camino óptico en la fase. Una explicación más detallada se puede obtener en Born [9].

$$\frac{d}{ds} \left[n \frac{d\vec{r}}{ds} \right] = \nabla n \quad (2.9)$$

En la ecuación (2.9), n representa el índice de refracción del medio, s denota la coordenada a lo largo de la trayectoria del rayo, y \vec{r} corresponde al vector de posición en cualquier punto arbitrario del viaje del rayo. Como se puede deducir el haz de luz atraviesa el objeto de fase (medio de análisis, ver figura 2.9), el cual se refracta de manera continua a lo largo del camino. Para pequeños ángulos de refracción ($ds \approx dx$ y $\xi_2 \approx \xi_2'$) por medio de la aproximación paraxial y asumiendo que los rayos permanecen en el plano xy la cual se considera como aproximación válida según Walsh [10], La ecuación (2.9) entonces se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[n \frac{\partial y}{\partial x} \right] = \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.10)$$

Integrando ambos miembros de la ecuación (2.10) desde el punto ξ_1 a ξ_2 se obtiene:

$$\left[n \frac{dy}{dx} \right]_{\xi_1}^{\xi_2} = 2 \int_0^{\xi_2} \frac{\partial n}{\partial y} dx \quad (2.11)$$

$$n_0 \alpha(y) = 2 \int_0^{\xi_2} \frac{\partial n}{\partial y} dx \quad (2.12)$$

Donde la inclinación del rayo de luz, $\frac{dy}{dx}$ es cero a la entrada del objeto de fase y es igual $\alpha(y)$ a la salida con $\frac{dy}{dx}$ siendo una cantidad infinitesimal. El índice de refracción es equivalente al valor del ambiente n_0 tanto en la entrada como a la salida del objeto de fase.

Transformando la ecuación (2.12) a coordenadas polares (8), tenemos que:

$$r^2 = x^2 + y^2; \quad \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{x}{y}; \quad dx = \frac{\partial x}{\partial r} dr \quad (2.13)$$

$$n_0 \alpha(y) = 2 \int_0^{\xi_2} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} dx = 2 \int_0^{\xi_2} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial r} dr \quad (2.14)$$

$$= 2 \int_y^\infty \frac{\partial n}{\partial r} \frac{y}{r} \frac{r}{x} dr = 2y \int_y^\infty \frac{\partial n}{\partial r} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (2.15)$$

Por tanto, el ángulo de deflexión estará dado como:

$$\alpha(y) = 2y \int_y^\infty \frac{\partial}{\partial r} \frac{n}{n_0} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (2.16)$$

La ecuación anterior es denominada función de proyección. Sin embargo, las mediciones de FLMD proporcionan los valores de la función $\alpha(y)$, la cual representa la integral de línea de la variación del índice de refracción en el objeto de fase. Para una distribución radial $n(r)$, se necesita este valor para poder realizar el cálculo. Para fortuna la ecuación anterior representa una Integral de Abel. La *Transformada Inversa de Abel* está dada entonces por [10-12].

$$\frac{n(r)}{n_0} = 1 - \frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{\alpha(y) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (2.17)$$

En esta ecuación r es la coordenada radial de un sistema de coordenadas polares. Una gran cantidad de algoritmos han sido utilizados para resolver la ecuación anterior [13-17]. A continuación, se hablará de esta solución.

2.5.1 Sistema de medición (B)

Este es un sistema de medición de moteado subjetivo con el objeto de análisis detrás del vidrio esmerilado. Aquí se considera un *Plano de Imagen (líneas punteadas)*, como se observa en la figura 2.10. Para este caso, sin embargo, el desplazamiento (ϵ), muestra un valor diferente a comparación del sistema (A). Lo cual como consecuencia ayuda en la mejor detección de los bordes de la imagen en el dispositivo de captura, mejorando también la eficiencia de la medición. Siendo este arreglo el utilizado para el tipo de objetos de estudio en este trabajo doctoral.

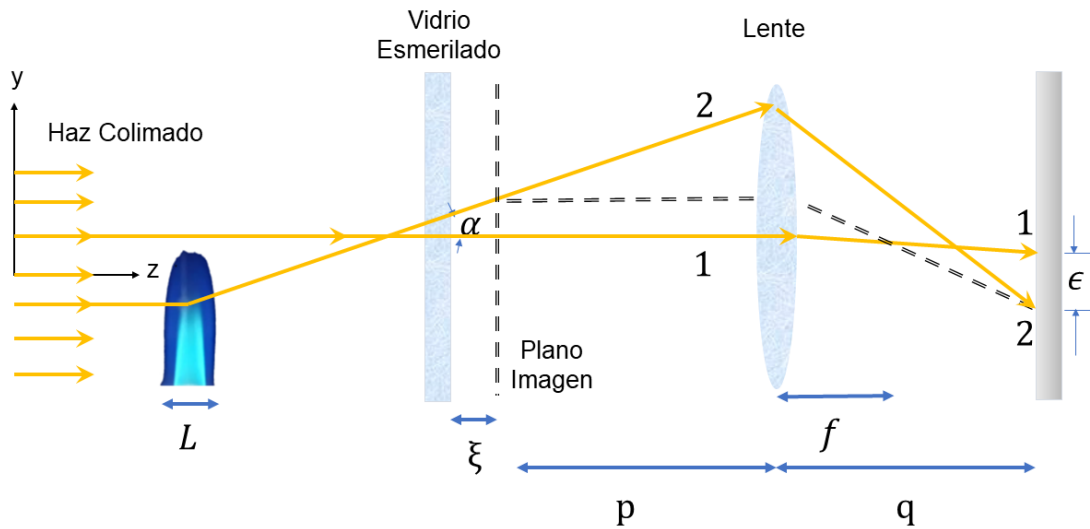


Figura 2.10 Sistema moteado tipo (B).

2.5.2 Solución analítica de la transformada de Abel y cálculo de temperatura

Para resolver la transformada inversa de Abel dada por la ecuación (2.17) Fomin [12] propone una solución analítica, en la cual pese a que esta integral presenta una singularidad cuando $y = r$, se calcula considerando el valor principal de la integral, lo cual en un análisis más detallado como el propuesto por Bracewell [18] se puede encontrar una relación directa entre la Transformada de Abel y la de Fourier.

Para poder resolverla se recurre a la partición de la integral en dos intervalos de análisis los cuales corresponden a un intervalo $I_1: [r, r + \delta]$ y un segundo dado por $I_2: [r + \delta, R]$, para eliminar la singularidad [12].

El procedimiento de solución es el siguiente:

$$f(r) = \int_r^\infty \frac{\alpha(y) dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} = \int_r^{r+\delta} \frac{\alpha(y) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} + \int_{r+\delta}^R \frac{\alpha(y) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (2.18)$$

En la primera de las integrales con intervalo I_1 , se puede resolver por método trigonométrico al partir de la aproximación $\alpha(y) = \alpha(r) + (r - y)\alpha'(r)$, mientras que la segunda con intervalo I_2 , se resuelve de forma directa.

$$\int_r^{r+\delta} \frac{\alpha(r) + (r-y)\alpha'(r) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} = \alpha(r) \left\{ \ln \left[r + \delta + \sqrt{\delta(2r + \delta)} \right] - \ln(r) \right\} + \alpha'(r) \left\{ \sqrt{\delta(2r + \delta)} - r \ln \left[r + \delta + \sqrt{\delta(2r + \delta)} \right] + r \ln(r) \right\} \quad (2.19)$$

Siendo la ecuación (2.19) la integral de interés para la mejora de la aproximación en la singularidad, una vez obtenida la solución analítica, las dos integrales se pueden resolver por métodos numéricos convencionales.

Al realizar el método numérico mencionado, se tendrá que utilizar la relación de Gladstone-Dale, mencionada en el capítulo 2, dada en este caso en coordenadas radiales como $n(r) - 1 = K\rho(r)$, y la ecuación de los gases ideales $P = \rho\mathcal{R}T$, donde ρ, \mathcal{R}, T corresponden a la densidad, la constante del gas y la temperatura del combustible sometido a análisis, respectivamente. Resultando en la ecuación (2.20), pero ahora en coordenadas radiales.

$$\frac{T(r)}{T_0} = \frac{\rho(r)}{\rho_0} = \frac{n(r) - 1}{n_0 - 1} \quad (2.20)$$

Dónde n_0 y ρ_0 son el índice de refracción y la densidad del aire a la temperatura ambiente T_0 , siendo $T(r)$ la temperatura de interés. La constante de Gladstone-Dale en este caso es una función de la longitud de onda de la fuente de iluminación y las propiedades físicas del combustible. La cual para este caso estará dada por:

$$K_{mix} = \sum Y_j K_j \quad (2.21)$$

Donde Y_j es la fracción de masa de composición y K_j es la constante de Gladstone-Dale de cada gas de la composición

Después de normalizar como en el método propuesto en [17] obtendremos la siguiente ecuación en función de la constante obtenida.

$$\frac{T(r)}{T_0} = \frac{\rho(r)}{\rho_0} = \frac{n_0 - 1}{n(r) - 1} \frac{K_m W_m}{K_{aire} W_{aire}} \quad (2.22)$$

Dónde K_m es la constante del gas de la mezcla, W_m es el peso molecular de la mezcla, mientras que K_{aire} y W_{aire} son la constante del aire y el peso molecular del mismo, respectivamente.

Lo cual da como resultado para la mezcla de gas LP utilizada $K_{mix} = 1.7 \times 10^{-4} \frac{m^3}{kg}$ en un cuarto a $293 \text{ }^\circ K$ y una longitud de onda de 632.8 nm .

2.6 Arreglo experimental

El propósito de este trabajo doctoral es la medición de campos de temperatura de flujo de fluido por medio de técnicas ópticas, en particular la relacionada con FLMD. Debido a esto una caracterización del sistema es necesaria para determinar la veracidad de las mediciones. En la figura 2.11, se puede observar un esquemático del arreglo. El sistema incluye un láser verde ($\lambda = 532nm$) de $20W$ como fuente de iluminación, un filtro espacial con un objetivo de microscopio de $20x$ y un pinole de $25 \mu m$, un espejo esférico de diámetro y distancia focal de 100 mm y 1200 mm respectivamente, un vidrio esmerilado y una cámara.

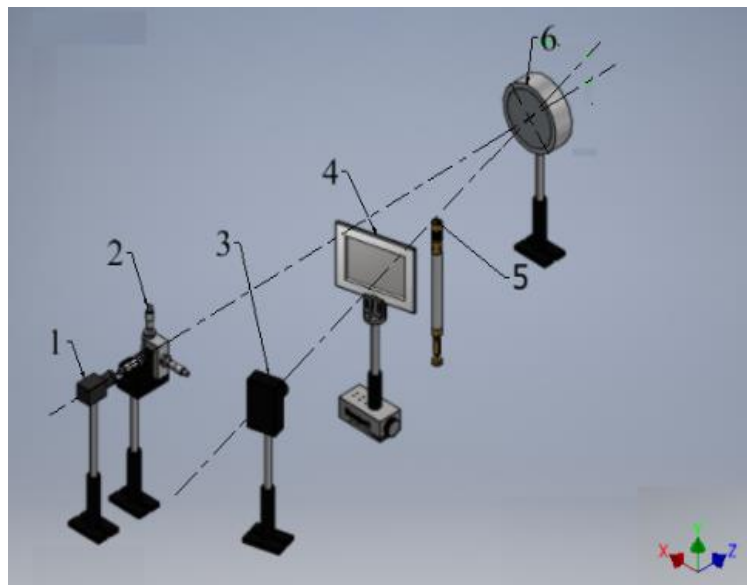


Figura 2.11 Arreglo óptico de FLMD. 1-Láser, 2-Filtro espacial, 3-Cámara Digital, 4-Vidrio Esmerilado, 5-Objeto de fase y 6-Espejo esférico.

El funcionamiento del sistema se describe a continuación: La luz emitida por la fuente de iluminación láser (1) pasa a través de un filtro espacial (2), éste se encuentra localizado a la distancia focal del espejo esférico. Lo cual como consecuencia genera que en (6), esta luz se refleje como un haz colimado, lo cual eliminada la necesidad de una lente de gran diámetro. El objeto de fase (5), es decir de estudio, es colocado entre el espejo (6) y el vidrio esmerilado (4). Cabe señalar que se debe tener especial cuidado en que exista perpendicularidad entre el eje óptico y el vidrio esmerilado (4). Ya que de lo contrario esto generará desplazamientos aparentes y por ende mediciones erróneas. La luz proveniente del vidrio esmerilado (4) es capturada por medio de una lente de distancia focal de 50 mm en una cámara digital (3). Las imágenes de moteado son entonces capturadas por la cámara digital, que para este trabajo es de la marca Lumenera modelo LU175, la cual puede realizar capturas a una velocidad de 30 cuadros por segundo y a una resolución de 1280 x 1024 pixeles, teniendo un tamaño de pixel de 5.2 μm . Estas imágenes son guardadas en formato BMP y digitalizadas a una escala de grises de 8 bits. La cámara es manejada por medio de un software que permite la toma de una o múltiples capturas.

2.6.1 Descripción de los objetos de fase.

Para cotejar la efectividad de las mediciones, tres objetos fueron sometidos a estudio, una resistencia cilíndrica de cerámica, una flama de una vela y una flama axisimétrica generada por un soplete de butano (figura 2.12). La resistencia cerámica consiste en un cilindro de diámetro 12.7 mm y longitud 203.2 mm, además de una potencia eléctrica equivalente de 600 W. La resistencia nos permite la medición y temperaturas entre el rango de 100 °C a 300 °C. El soplete utilizado en este trabajo tiene una diámetro interior y exterior de 5 mm y 19 mm, respectivamente. El mismo soplete tiene cuatro orificios los cuales sirven para la admisión de flujo de aire por medio de efecto Venturi para asegurar una mezcla aire-combustible apropiada. Las mediciones fueron obtenidas con los cuatro orificios completamente abiertos. La presión de butano fue controlada por medio de un regulador y realizada a presión constante de 0.8 MPa (figura 2.12c).

La resistencia, la flama de la vela y el soplete fueron posicionados de manera completamente vertical en la mesa óptica. La dirección del flujo por tanto es a lo largo del eje 'y'. Todas las mediciones realizadas fueron en un cuarto a una temperatura de 19 °C.

En cuanto al tamaño de la mota se conservó en alrededor de $10 \mu m$, buscando cumplir con el criterio de Nyquist, de que al menos se cumpla con el doble del tamaño para que los desplazamientos sean detectables, trabajos como el de Richard [19], proporcionan un análisis extenso del efecto de la apertura numérica y de la fuente de iluminación para la mejora de las mediciones

y como consecuencia seleccionando un número $f/16$. Este cálculo se realizó al utilizar la ecuación (2.7) referente al diámetro de la mota.

a)



b)



c)

Figura 2.12 Soplete a), Resistor b) y tanque regulado c).

2.6.2 Procedimiento experimental

Para la medición se utilizó la técnica de doble exposición, la cual consiste en la captura de una imagen de referencia sin flujo. Después un total de 50 imágenes instantáneas con flujo para cada caso de estudio fueron tomadas. El siguiente paso fue el cálculo de los respectivos desplazamientos $\Delta\zeta$ ('x' e 'y') para cada imagen instantánea de moteado por medio de un algoritmo de correlación cruzada, los desplazamientos obtenidos se muestran en figura 2.13, correspondiendo a los flujos que emanan de cada objeto de fase. Cabe destacar que el desplazamiento máximo observable es de 0.36, 1.66 y 2.3 pixeles para la resistencia cerámica, la vela y el soplete, respectivamente. El software utilizado para el análisis de correlación fue proVISION-XS de la compañía IDT [20].

a)

b)

c)

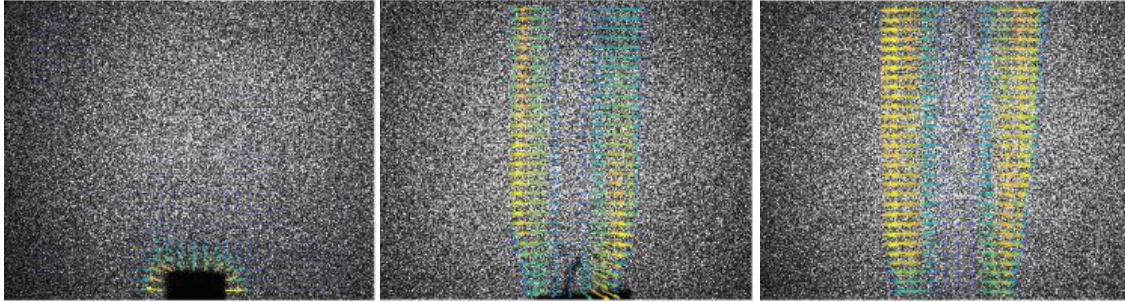


Figura 2.13 Imágenes de moteado con los desplazamientos respectivos sobrepuestos a) Resistencia cerámica, b) Flama de la vela, c) Flama del soplete.

Una vez obtenidos los campos de desplazamientos de cada uno de los mapas de correlación, se procedió a realizar el cálculo de los campos de densidad por medio del procedimiento descrito en la sección 2.5 [17]. Las densidades resultantes son sustituidas en la ecuación siguiente:

$$T = \frac{\rho_o}{\rho} T_o = \frac{n_o - 1}{n - 1} T_o \quad (2.23)$$

Dónde n_o y ρ_o son el índice de refracción y la densidad del aire a la temperatura ambiente T_o , siendo T la temperatura de interés.

La figura 2.14 corresponde a los mapas de contorno promedio de los tres campos de temperatura para los objetos de estudio. Los valores máximos de temperatura obtenidos de los mismos fueron de 131°C , 1348°C y 1811°C para el resistor, vela y soplete respectivamente. Se encontró que la temperatura de la superficie del resistor es consistente con la obtenida por medio de un termopar $\sim 120^{\circ}\text{C}$. Calculando el error relativo de estos dos resultados, se obtuvo un valor de 9.1%. Los cuales concuerdan con los presentados por otros autores (18)

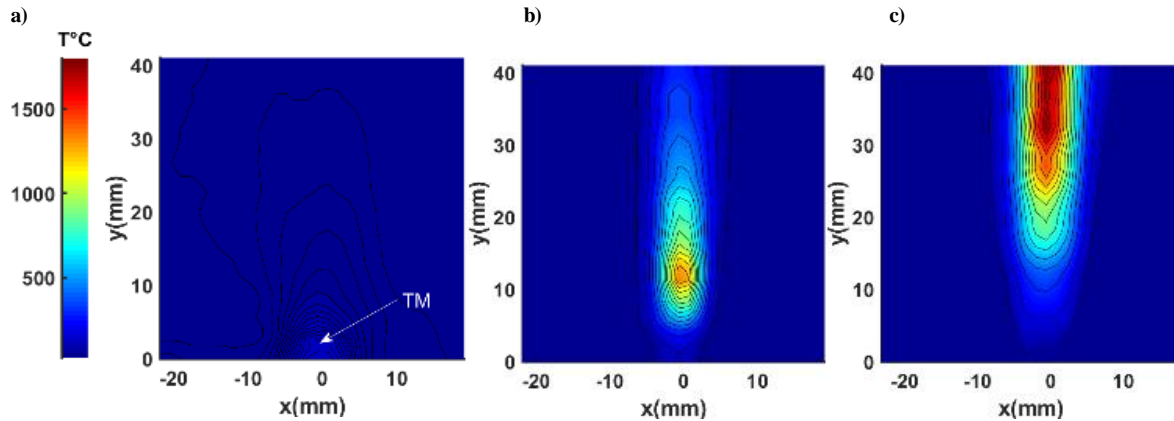


Figura 2.14 Campos de temperatura promedio a) Resistencia Cerámica, b) Flama de la vela, c) Flama axisimétrica generada por el soplete de gas butano, TM indica la posición de la medición de termopar.

2.7 Conclusiones

En este capítulo se realizó la caracterización del sistema de FLMD para la medición de temperatura en campos de flujo de fluido. Obteniendo en base al análisis de los 3 objetos de fase estudiados (vela, soplete y resistencia), que el rango de medición abarca desde valores de $\sim 131^{\circ}\text{C}$ hasta $\sim 1811^{\circ}\text{C}$. A pesar de mantenerse la lectura dentro de este rango, es posible realizar mediciones arriba de 2000°C . Por tanto, se obtuvo una caracterización del rango de medición de temperatura del sistema óptico, además de comparativas entre el efecto de distinto números #F y contraste del patrón de moteado.

Referencias

- [1] Dainty, JC. Laser speckle and related phenomena. *Appl Opt.* 23(16), 12-18.
- [2] Goodman, JW. (1996). *Introduction to Fourier Optics*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Guo, Z.-Y. and Song, Y.-Z. (1993). Laser speckle photography for heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7(2), 128.
- [4] Richard, H. and Raffel, M. (2001). Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method. *Measurement Science and Technology*, 12(9), 1576–1585.
- [5] Meier, AH. and Roesgen, T. (2013). Improved background oriented schlieren imaging using laser speckle illumination. *Experiments in Fluids*, 54(6)
- [6] Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. and Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*.
- [7] Kompenhans, J., Raffel, M., and Willert, C. (1998). *Particle Image Velocimetry (PIV) a New Powerful Technique for the Investigation of Unsteady Flow Fields in Large Wind Tunnels*.
- [8] Wolfgang, M. (1987). *Flow Visualization* (second edition ed.). Academic Press, Inc.

- [9] Born, M. and Wolf, E. (1964). Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light. Oxford: Pergamon Press.
- [10] Walsh, TE. and Kihm. KD. Tomographic deconvolution or laser speckle photography for axisymmetric flame temperature measurement. J. of Flow Vis. and image process. 1995; vol. 2: 299-310.
- [11] Vest, CM. (1979). Holographic Interferometry. John Wiley, New York.
- [12] Fomin, NA. (1998). Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements. Germany: Springer.
- [13] Daun, KJ., Thomson, KA., Liu, F., & Smallwood, GJ. (2006). Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization. Applied Optics, 45(19), 4638.
- [14] González-Ramírez, E., de la Rosa Miranda, E., Arceo-Olague, JG., Villa-Hernández, JJ., de la Rosa Vargas, I., Saucedo Anaya, T., Araiza-Esquivel, MA. (2013). Abel transform inversion using Kalman filter. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. Porto, Portugal (18 November 2013).
- [15] Dribinski, V., Ossadchi, A., Mandelshtam, Vladimir and Reisler, H. (2002). Reconstruction of Abel-transformable images: The Gaussian basis-set expansion Abel transform method. Review of Scientific Instruments. 73.
- [16] Liu Chang, Xu Lijun, Cao Zhang and Li Fangyan. (2014). One-dimensional tomography of axisymmetric temperature distribution with limited TDLAS data by using three-point Abel deconvolution. IST 2014 - 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Proceedings. 432-435.
- [17] Fujisawa, N., Aiura, S., Ohkubo S. and Shimizu, T. (2009). Temperature Measurement of Dilute Hydrogen Flame by Digital Laser-Speckle Technique. J of Vis. 12 (1):57-64
- [18] Bracewell, Ronald N. (1978). The Fourier Transform and Its Applications. McGraw-Hill.
- [19] Richard, H. and Raffel, M. (2001). Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method. Meas Sci Technol 12(9), 1576–1585.
- [20] Lourenco, L., and Krothapalli, A. Mesh-free second order accurate algorithm for PIV processing. In Proceedings of the International Conference on Optical technology and image processing in fluid thermal and combustion flow. Visualization Society of Japan, Yokohama, (1998, December)

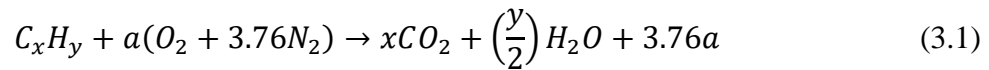
Capítulo 3 Medición simultánea de temperatura y color espectral de flamas

La eficiencia de diferentes combustibles siempre ha resultado en un tópico de interés para fenómenos de combustión. Las mediciones de temperatura y de espectro de color de flamas de combustión premezcladas son parámetros claves en este estudio. En este capítulo se hablará de la medición simultánea con una modificación al arreglo óptico presentado en el capítulo 2. La ventaja del arreglo óptico de FMLD es que no es necesaria una sincronización de las dos mediciones, evitando complicadas alineaciones y usando únicamente una sola cámara digital. Por el contrario, las dos mediciones, tanto de temperatura como de espectro de color son realizadas utilizando FMLD y un procesamiento digital de imágenes. Las mediciones obtenidas son almacenadas usando una cámara digital a color, donde el canal de color rojo (r) es utilizado para almacenar los datos referentes a temperatura, y los canales azules (b) y verde (g), para guardar la información del espectro de color de la flama. En cuanto a los cálculos realizados para los campos de temperatura, se utilizó una inversión por medio de la transformada de Abel, mientras el procesamiento de imágenes necesitó de una corrección de crosstalk, segmentación y filtrado. La corrección de crosstalk ayudo a establecer una relación inequívoca entre el color de las imágenes y el espectro de color de la flama. La técnica fue probada en flamas producidas por medio de Gas LPG (Gas Líquido de Petróleo, Liquefied Petroleum Gas en inglés), las cuales fueron obtenidas modificando el flujo volumétrico del combustible y por consecuencia la razón equivalente (Φ). Los valores de temperatura obtenidos por este método fueron comprobados por medio de medición de termopar. En este capítulo se hablará primeramente de los aspectos teóricos referentes a flamas premezcladas con flujo laminar, entre ellas la más típica el mechero de Bunsen. Después se hablará del balance químico en la combustión para definir la razón equivalente. Como última parte se hablará del efecto de crosstalk en las cámaras a color y como corregirlo, además de hablar del arreglo óptico utilizado para la medición de temperatura y de espectro de color.

3.1 Valor estequiométrico

El valor estequiométrico es definido por Turns [1] como: “*Cantidad necesaria de oxidante (en el caso de este trabajo aire) para poder quemar cierta cantidad de combustible*”. Sí la cantidad de oxidante suministrada es mayor que la de combustible, se dice que la mezcla es **pobre**; mientras que, si la cantidad de combustible es mayor que el oxidante, se dice que estamos ante un caso de mezcla **rica** en combustible.

Estas cantidades de oxidante estequiométrico pueden ser determinadas por medio de un simple balance atómico, es decir utilizan balances químicos. Dado un hidrocarburo combustible por C_xH_y , la relación estequiométrica puede ser expresada como:



$$a = x + \frac{y}{4} \quad (3.2)$$

Nótese que los términos x e y de la ecuación (3.2) están relacionados con la cantidad de carbono e hidrógeno de la ecuación (3.1), resultando en el coeficiente a , para el balanceo químico de la primera. Para simplicidad, se asumirá durante todo este trabajo que existe una composición simplificada de aire (o aire ideal), la cual consiste de 21 por ciento O_2 y 79 por ciento N_2 (estas cantidades son por unidad de volumen). Por ende, si se tuviera un mol de O_2 en aire, existirán como consecuencia 3.76 moles de N_2 .

La **relación estequiométrica** de aire-oxígeno puede ser encontrada como:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{Est} = \left(\frac{m_A}{m_C}\right)_{Est} = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_A}{MW_F} \quad (3.3)$$

Donde MW_A corresponde al peso molecular del aire, MW_F es el peso molecular del combustible y los subíndices Est, A y C , son Estequiométrico, Aire y combustible respectivamente.

La **razón equivalente Φ** (Equivalent Ratio, en inglés), es usada de manera frecuente para indicar de forma cuantitativa cuando una mezcla es **rica, pobre o estequiométrica**. La definición de Φ es la siguiente:

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{Est}}{\left(\frac{A}{F}\right)} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{\left(\frac{F}{A}\right)_{Est}} \quad (3.4)$$

Donde $\left(\frac{A}{F}\right)$ es la razón masa Aire- Combustible.

Para esta definición podemos observar que para $\Phi > 1$, la mezcla es rica en combustible, mientras que para $\Phi < 1$, se concluye que la mezcla es pobre.

3.2 Flamas Laminares premezcladas

El perfil de temperatura de una flama es por mucho una de las características más importantes del proceso de combustión. El sistema de coordenadas más apropiado es aquel que se adecua a la propagación de la onda de combustión. Un observador que aparentemente “viaja” con la flama experimentaría una velocidad de desplazamiento conocida como, **velocidad de flama** o S_L . Esta definición también es aplicable a una flama estabilizada en un quemador. Para nuestro análisis, la flama se encuentra aparentemente estable respecto a nuestro marco de referencia, el cual sería la mesa del arreglo óptico, y por tanto los reactantes entran en la flama con una velocidad igual a la velocidad de propagación S_L .

Así entonces es importante dividir la flama en 2 secciones: La zona de precalentamiento, donde una muy pequeña cantidad de calor es liberada; y la zona de reacción, donde la mayor parte de la energía química es liberada y la cual por ende contiene los perfiles con el mayor valor de temperatura, los cuales serán de interés para su estudio.

3.2.1 Flamas típicas de laboratorio: El mechero de Bunsen

Un ejemplo interesante y bastante claro de flamas premezcladas laminares es el mechero de Bunsen, el cual es de fácil manejo y accesibilidad.

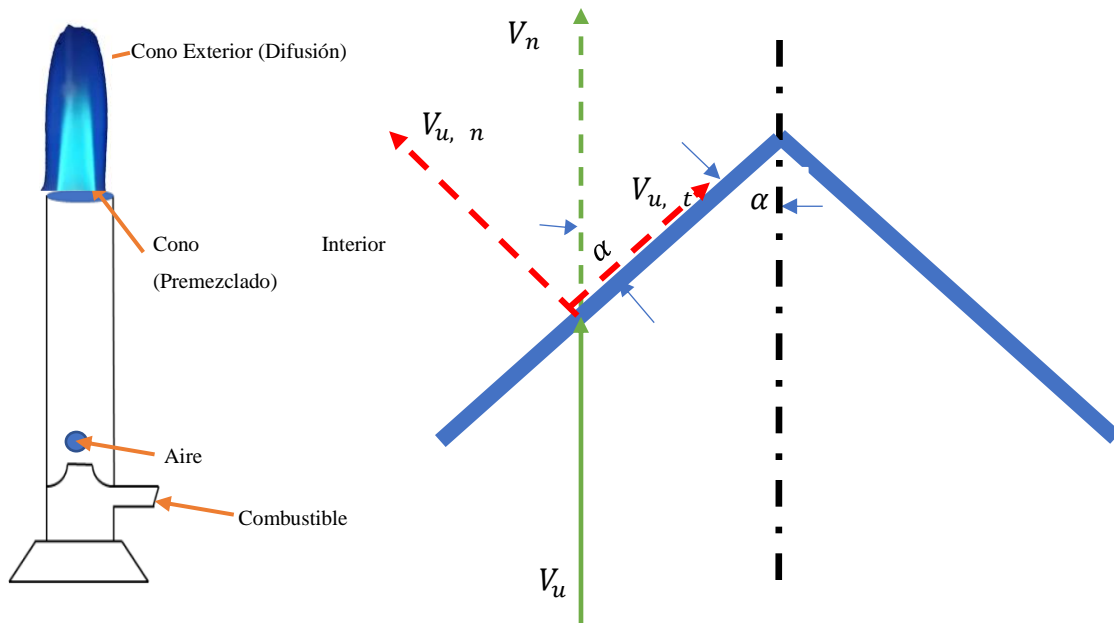


Figura 3.1 Diagrama Vectorial de la velocidad en una flama premezclada.

La figura 3.1 muestra el diagrama vectorial de la velocidad de la flama, el cual consiste en lo siguiente. El flujo de combustible que se introduce al mechero induce la generación de un flujo de aire, el cual puede ser regulado al manipular el área efectiva señalada de color azul, una vez que el combustible avanza a través del mechero, se genera una mezcla aire-combustible. Un mechero de Bunsen típico tiene una flama dual, la cual se constituye de una sección rica en combustible en la parte interior y que a su vez es rodeada por una flama de difusión. La flama de difusión resulta cuando los productos generados por el monóxido de carbono (CO) e hidrógeno emergen hacia el ambiente. El contorno de la flama es determinado por los efectos de la velocidad de la flama S_L y las pérdidas de calor generadas por el tubo del mismo mechero. Para que la flama permanezca en el estado estacionario, la velocidad de flama debe ser igual a la componente de velocidad normal del gas sin quemar en cada punto, como se ilustra en el diagrama de vectores. Por tanto:

$$S_L = V_u \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

Donde S_L se conoce como la velocidad de flama y V_u el vector de velocidad del flujo de combustible.

3.3 Relación de la razón de equivalencia, velocidad y temperatura

Excepto para mezclas ricas, el efecto primario de la **razón de equivalencia** en la velocidad de flama para combustibles similares da como resultado una afectación en los valores de temperatura; entonces se esperaría que la velocidad de la flama sea máxima en una mezcla ligeramente rica y decaiga en cualquier punto lejos de este contexto.

Algunos autores mencionan el comportamiento típico de la razón equivalente para distintos combustibles [2-5]. En particular existe un estudio para temperatura en dispositivos que utilizan como combustible gas LPG (Liquefied Petroleum Gas) [6]. En este trabajo se observa que cerca de $\Phi = 1$, la velocidad de flama S_L , tiende a ser un máximo, lo cual a su vez como consecuencia genera la expectativa de un máximo de temperatura.

3.4 Mediciones de espectro de color, corrección del efecto crosstalk

Una imagen que se obtiene de una cámara de color puede ser separada en tres canales de color diferentes, donde cada canal corresponde a los colores rojo, verde y azul. Cada canal provee una información específica acerca del objeto sometido a análisis. Dado que las cámaras son construidas por medio de un filtro tipo Bayer (ver figura 3.2), el color verde siempre es más sensible que los otros dos colores.

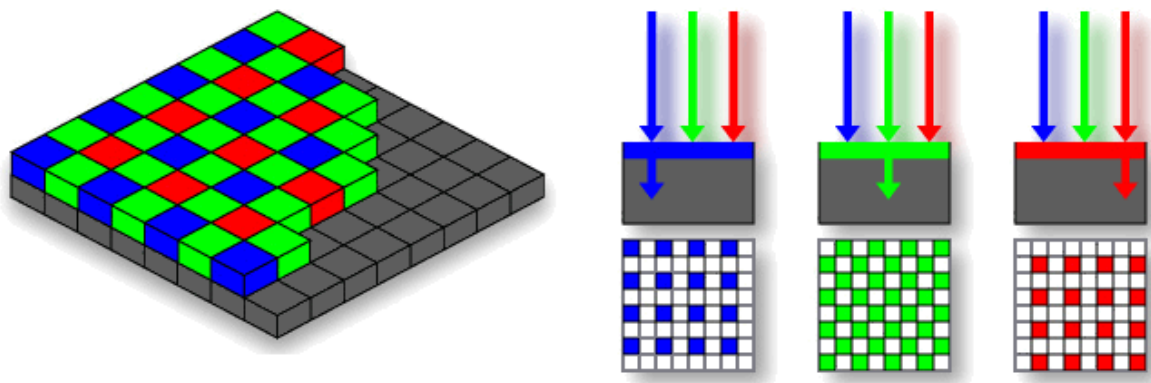


Figura 3.2 Distribución de un filtro tipo Bayer (7).

Suponiendo que se tienen control de las especificaciones de la cámara como son: intensidad, tiempo de exposición, gamma y valores de ganancia. En ese caso, es posible regular el valor de la intensidad de cada valor, además de trabajar con los tres canales a

iguales niveles de intensidad. El valor de intensidad en cada canal puede ser aproximado en una matriz con la forma siguiente:

$$\hat{I}_i = \sum_{j=0}^2 A_{ij} I_j \quad (3.6)$$

Donde A_{ij} representa el efecto de crosstalk de una cámara digital además de ser los coeficientes de calibración relacionados con la respuesta espectral del color de los píxeles a una iluminación incidente específica.

El subíndice i pertenece a cada canal de color y j para el color de la fuente de iluminación. En otras palabras \hat{I}_i , son las intensidades proyectadas en los canales rojo, verde y azul.

Como sea, los valores numéricos de las intensidades de I_j no se conocen de manera explícita y necesitan ser determinados por medio de la misma ecuación (3.6), ésta puede ser representada en su forma expandida como:

$$\hat{I}_r = A_{r0} I_0 + A_{r1} I_1 + A_{r2} I_2 \quad (3.7)$$

$$\hat{I}_g = A_{g0} I_0 + A_{g1} I_1 + A_{g2} I_2 \quad (3.8)$$

$$\hat{I}_b = A_{b0} I_0 + A_{b1} I_1 + A_{b2} I_2 \quad (3.9)$$

Así, los coeficientes A serán determinados relacionando la respuesta espectral de los píxeles de la cámara para determinada fuente de iluminación incidente. En nuestro arreglo óptico el canal rojo se encarga de realizar la medición proveniente del haz de luz láser (temperatura); solamente dos colores, verde y azul, emanan de la flama y son usados para el efecto de quimioluminiscencia. Estas especies químicas derivadas del proceso de combustión emiten en la región visible del espectro electromagnético alrededor de $\sim 430 \text{ nm}$ para CH^* y $\sim 515 \text{ nm}$ para C_2^* [8], mientras que un láser He-Ne de longitud de onda de 633 nm es usado para mediciones de temperatura con FLMD.

Debido a que solamente los canales verde y azul son usados para el estudio de la quimioluminiscencia, solo B1, B2, G1 y G2 son considerados para el análisis de datos. Entonces si nosotros cambiamos los subíndices 1 y 2 por G y B respectivamente en las ecuaciones (3.8) y (3.9), respectivamente, tendremos:

$$\hat{I}_g \approx A_{gG}I_G + A_{gB}I_B \quad (3.10)$$

$$\hat{I}_b \approx A_{bG}I_G + A_{bB}I_B \quad (3.11)$$

Al combinar las ecuaciones (3.10) y (3.11) se obtiene la siguiente solución, para cada una de las intensidades.

$$I_G = \frac{A_{bB}\hat{I}_g - A_{gB}\hat{I}_b}{A_{gG}A_{bB} - A_{gB}A_{bG}} \quad (3.12)$$

$$I_B = \frac{A_{gG}\hat{I}_b - A_{bG}\hat{I}_g}{A_{gG}A_{bB} - A_{gB}A_{bG}} \quad (3.13)$$

Las ecuaciones (3.12) y (3.13) se utilizan para calcular la intensidad corregida del respectivo canal contra el efecto de crosstalk, los coeficientes de las mismas se obtienen de la figura 3.3.

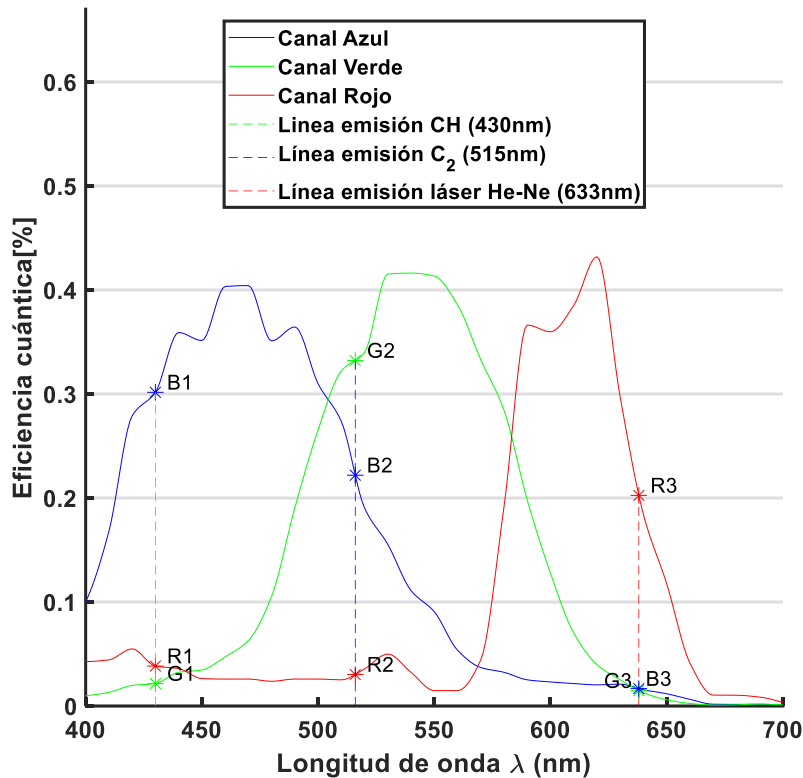


Figura 3.3 Respuesta espectral de la cámara de color LT225c

3.5 Algoritmo de procesamiento de imágenes para obtener el espectro de color visible

Aunque las intensidades registradas en los canales azul y verde representan básicamente las concentraciones de CH^* y C_2^* de la combustión de la flama, se debe considerar que las imágenes obtenidas contienen ruido debido a la presencia de moteado residual, debido a las mediciones realizadas por la medición de temperatura del sistema (vidrio esmerilado). Entonces, para reducir el ruido del moteado, un algoritmo ha sido implementado en tres simples pasos: corrección del crosstalk de la imagen, segmentación de imagen y filtrado de imagen.

Dejemos que $I_{(n,m)}^{0rgb}$ sea una imagen a color guardada como referencia en el plano imagen (la imagen de referencia rgb una imagen sin objeto de estudio) e $I_{(n,m)}^{frgb}$ sea una imagen a color grabada en el plano de observación en presencia del objeto de estudio (en nuestro caso, una flama premezclada). Para este caso, $n = 0, 1, \dots, k$ y $m = 0, 1, \dots, l$, con k y l como en número de píxeles de la imagen y r, g, y b pertenecen a los canales de los colores rojo, verde y azul, respectivamente. Cada imagen de color; $I_{(n,m)}^{0rgb}$ e $I_{(n,m)}^{frgb}$ son separadas en sus canales, y los colores verde y azul son corregidos contra el efecto de crosstalk, tal como se explica en la sección 3.4. Entonces de acuerdo a la ecuación (3.6), cada canal es transformado en: $I_{(n,m)}^{0R}$, $I_{(n,m)}^{0G}$, $I_{(n,m)}^{0B}$ e $I_{(n,m)}^{fR}$, $I_{(n,m)}^{fG}$, $I_{(n,m)}^{fB}$ para la referencia y la imagen de la flama respectivamente. Las componentes $I_{(n,m)}^{fR}$ e $I_{(n,m)}^{0R}$ son usada para calcular los campos de temperatura por medio de FLMD. Y los canales azul y verde son utilizados para obtener las concentraciones CH^* y C_2^* generadas por el espectro de color de la flama, respectivamente.

El algoritmo presentado a continuación nos permite calcular una máscara únicamente para el canal verde, sin embargo, sin una pérdida de información considerable, la misma máscara es utilizada para el canal azul [9]. Así entonces el algoritmo se puede describir en los siguientes tres pasos:

- a) **Reducción de ruido generado por el moteado.** Para los canales azul y verde, las imágenes de referencia son sustraídas de las imágenes del objeto para obtener las siguientes expresiones:

$$I_{(n,m)}^{(f-0)G} = I_{(n,m)}^{f0G} = I_{(n,m)}^{fG} - I_{(n,m)}^{0G} \quad (3.14)$$

$$I_{(n,m)}^{(f-0)B} = I_{(n,m)}^{f0B} = I_{(n,m)}^{fB} - I_{(n,m)}^{0B} \quad (3.15)$$

Esta operación contribuye puesto que nos permite eliminar la mayor cantidad de ruido de moteado que se encuentra en las imágenes.

- b) **Segmentación de la imagen.** Es bien sabido que la imagen de la flama puede ser considerada como dos regiones, el ruido de fondo y los datos de la flama. Analíticamente estas regiones son definidas por medio de un valor de umbra de la manera siguiente:

$$I_{(n,m)}^{f0G} = \begin{cases} N & I_{(n,m)}^{f0G} < t \\ F & I_{(n,m)}^{f0G} \geq t \end{cases} \quad (3.16)$$

N es el ruido de fondo de la imagen, F es la información de la flama, y t es un valor adecuado de umbral que separa de forma correcta las dos regiones. El valor de t es obtenido por medio de un método iterativo.

Un valor de prueba, t^1 , es calculado tomando una pequeña porción del fondo de la imagen utilizando la siguiente ecuación.

$$t^1 = \overline{I_{\beta}^{f0G}} + 2\sigma(I_{\beta}^{f0G}) \quad (3.17)$$

Donde la barra significa que es el valor promedio, el subíndice β es una pequeña porción de fondo de la imagen, y σ es la desviación estándar.

-El ruido de fondo es aislado de la flama encontrando valores inferiores y superiores del valor umbral calculado en la ecuación (3.17). Una nueva imagen es entonces definida como: $I_{(n,m)}^{f01G}$.

-De esta nueva imagen, un nuevo fondo es obtenido para calcular un nuevo valor de umbral de la siguiente ecuación:

$$t^2 = \overline{I_{\beta}^{f01G}} + 3\sigma \left(I_{\beta}^{f01G} \right) \quad (3.18)$$

Después de aplicar este nuevo valor la nueva imagen es nombrada como; $I_{(n,m)}^{f02G}$. Este procedimiento es repetido hasta que no existen cambios significativos en el valor umbral. Cabe aclarar que una consecuencia clara de que esto ocurre es una disminución de σ para cada iteración.

- c) **Filtrado de la imagen.** Después del proceso de segmentado de la imagen, la imagen de la flama sigue presentando un efecto residual debido al moteado, para mejorar los resultados el método de Descomposición por Valor Singular (SVD, siglas en inglés) es aplicado. Los datos resultantes del proceso completo son usados para determinar los valores de CH^* y C_2^* almacenados en los canales azul y verde de la cámara digital.

3.6 Arreglo experimental

El principal propósito de este trabajo es la medición de temperatura y el espectro de color de flamas premezcladas de manera simultánea. Esto como consecuencia natural de la formación de imagen por medio de FLMD y un procesamiento digital de imágenes para el manejo de datos, es necesario utilizar un láser de He-Ne para las mediciones de temperatura y una cámara de tres colores para almacenar los datos, tanto de moteado como los respectivos de espectro de color, en el canal rojo para lo primero y en los canales azul y verde para lo segundo. La figura 3.4, muestra un dibujo esquemático del arreglo óptico, además de una vista descriptiva del soplete de gas LP. El sistema óptico incluye un láser He-Ne de 25 mW ($\lambda = 633 \text{ nm}$, L), el cual es la fuente de iluminación, un filtro espacial con un objetivo de microscopio de 40 \times y una apertura micrométrica de 25 μm (SF), un espejo esférico (M1) de diámetro y distancia focal 10.0 cm y 120.0 cm respectivamente y un vidrio esmerilado (GG), un espejo plano cuadrado (60 \times 60 cm^2 , M2), un divisor de haz (5 \times 5 cm^2 y una relación de transmisión 50/50, BS) y una cámara digital (C). El vidrio esmerilado utilizado para la generación del efecto de moteado tiene unas dimensiones de 12.5 \times 9.5 cm^2 y fue obtenido a partir de vidrio de ventana y pulido con un grano de 25 μm .

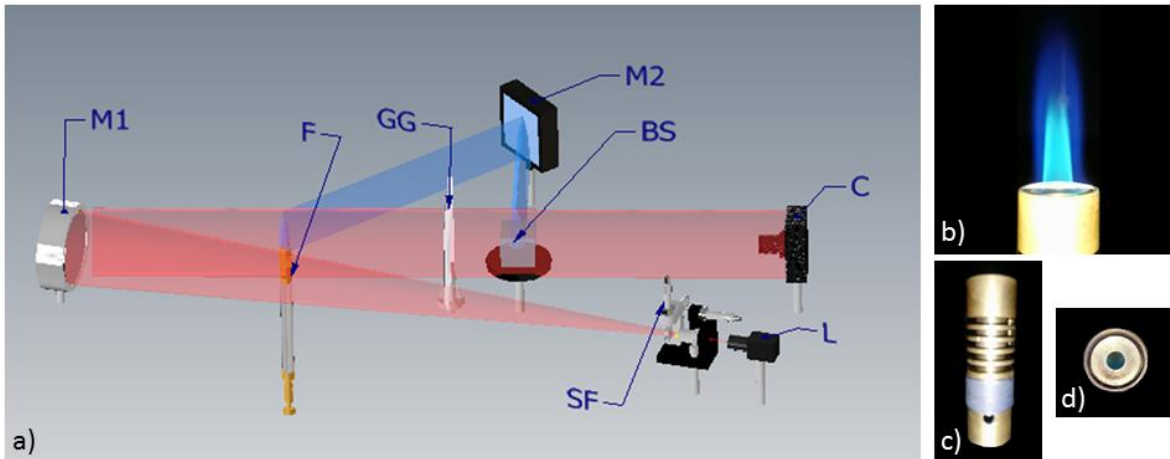


Figura 3.4 Arreglo experimental para medición de temperatura y espectro de color a) arreglo óptico, b) soplete de gas LP vista lateral con flama, c) boquilla del soplete, vista lateral, d) boquilla del soplete, vista superior. M1: Espejo esférico, F: Soplete de gas LP, GG: Vidrio Esmerilado, M2: Espejo plano, BS: Divisor de haz, C: Cámara digital a color, SF: Filtro espacial, L: Láser He-Ne.

Las imágenes fueron capturadas por una cámara modelo LT225c de la compañía Lumenera, ésta tiene un tamaño de sensor de 2.2 Megapíxeles y es tipo CMOS, además de tener un tamaño de píxel de $5.5 \mu m$. La respuesta espectral de los píxeles de la cámara ha sido adquirida por medio de un set de datos de caracterización del fabricante [10], esto se puede observar en la figura 3.3. La cámara puede realizar la captura de 170 cuadros por segundo a resolución completa, las imágenes son almacenadas en formato BMP y digitalizadas a nivel de intensidad de 8 bits a color. La cámara es manejada por medio de un software que provee el fabricante, con lo cual es posible realizar la captura de una sola imagen o múltiples. La resolución espacial del sistema nos permite una observación extensiva del proceso de combustión en la flama premezclada.

En la figura 3.4, dos haces distintos son observados. El rojo que contiene la información del moteado en el haz de luz láser, y el azul que genera una imagen virtual en el espejo plano, misma que contiene la información de la quimioluminiscencia de la flama de manera directa. Estos dos haces son recombinados en el divisor de haz y enviados a la cámara digital para almacenar los datos de temperatura en el canal rojo y la quimioluminiscencia en el canal azul y verde. Además, debido a que el tamaño de la mota es directamente proporcional a la longitud de onda de la luz, el canal rojo es utilizado para las mediciones de temperatura debido a esta ventaja adicional.

Las imágenes son almacenadas usando una lente de una distancia focal de 50 mm. Un número- f 16 ha sido seleccionado para obtener un tamaño de mota de $\sim 12 \mu m$, además de buscar cumplir con el criterio de Nyquist del sistema óptico de FLMD (11). Otra ventaja adicional del número- f seleccionado es el incremento de la profundidad de foco, lo cual ayuda a evitar imágenes fuera de foco de FLMD y de espectro de color. Las magnificaciones del sistema óptico son de 0.124 y 0.021 para FLMD y para las imágenes de espectro de color respectivamente.

Para el arreglo de FLMD, la luz emitida por el haz de luz láser primero pasa a través de un filtro espacial localizado en el punto focal del espejo esférico. El haz colimado proveniente del espejo esférico ilumina el vidrio esmerilado. Después de que los valores de referencia son obtenidos (mismo procedimiento sin objeto), el objeto de estudio es colocado entre el espejo esférico y el vidrio esmerilado. Para evadir errores de desplazamiento aparente el vidrio esmerilado debe de ser colocado perpendicular al eje óptico. La luz esparcida proveniente del vidrio esmerilado es grabada en la cámara digital después de recombinarse en el divisor de haz.

De manera simultánea, un haz de luz de la flama es reflejado en el espejo plano y viaja hasta el cubo divisor de haz pasar a través del vidrio esmerilado. Este haz reflejado es recombinado con el formado por el arreglo de FLMD en el divisor de haz; la imagen final es entonces almacenada.

El objeto sometido a análisis para este caso particular es una flama premezclada (CH^* , C_2^*) la cual se genera por el efecto del soplete de gas LP (ver figura 3.4 b-d). La misma tiene una configuración axisimétrica con un diámetro interior y exterior de 0.5 cm y 1.9 cm, respectivamente. La boquilla contiene cuatro orificios que admiten aire por medio de efecto Venturi. Nuestros experimentos son realizados para generar una mezcla completa de aire/combustible, y la boquilla del soplete es alimentada con un cilindro de gas LP. En los 6 experimentos realizados, los rangos de flujo volumétrico van de $0.64 \frac{L}{min}$ a $0.84 \frac{L}{min}$ con un incremento aproximado de $0.04 \frac{L}{min}$. Una presión de trabajo constante de 120 psi fue regulada a la salida del tanque de gas LP y a lo largo de la tubería y soplete con la finalidad de garantizar la repetibilidad de las mezclas. La boquilla del soplete es posicionada

verticalmente en una mesa óptica. Todas las mediciones de los campos de temperatura y espectro de color fueron realizadas en un cuarto a 23°C. En la tabla siguiente se muestra las condiciones experimentales de mezcla.

Tabla 4 Gas LP condiciones experimentales.

Razón Equivalente (Φ)	Flujo volumétrico de combustible	Flujo volumétrico de combustible	Flujo volumétrico de Aire
	$\left(\frac{L}{min}\right)$	$\left(\frac{L}{min}\right)$	$\left(\frac{L}{min}\right)$
	Propano (70%)	Butano (30%)	
0.95	0.448	0.192	16
1.00	0.476	0.204	16
1.05	0.504	0.216	16
1.11	0.532	0.228	16
1.16	0.560	0.240	16
1.21	0.588	0.252	16

3.7 Análisis de Datos

Primeramente, para las mediciones de temperatura, una imagen de referencia de moteado sin la presencia de la flama es grabada, entonces 500 imágenes instantáneas con el flujo (flama) son adquiridas para cada una de los 6 casos experimentales. La figura 3.5a muestra una imagen de la flama premezclada capturada por medio del arreglo óptico presentado en este capítulo. Las características predominantes en la imagen son el contorno de la flama y el moteado debido al efecto del vidrio esmerilado. Como sea, cuando la imagen es dividida en sus respectivos canales de color, las contribuciones generadas por CH^* y C_2^* , son almacenadas respectivamente en los canales azul y verde (figura 3.5c-d).

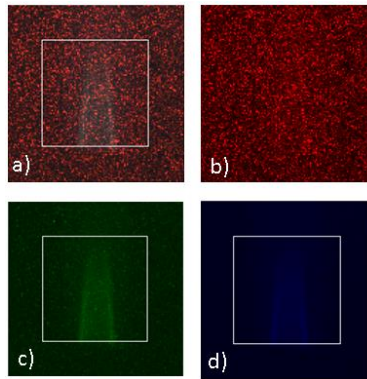


Figura 3.5 Imagen instantánea del experimento, a) Imagen a colores, b) Imagen del canal rojo, c) Imagen del canal verde, d) Imagen del canal azul.

Para medir los campos de temperatura con el FLMD es necesario realizar la comparación con dos patrones, como ejemplo, una imagen de referencia ($I_{(n,m)}^{0R}$) y patrón deformado de moteado como ($I_{(n,m)}^{fR}$). Desde que el granulado del patrón de moteado es similar a las partículas utilizadas en un arreglo clásico de PIV (Velocimetría de Partículas por Imagen, siglas en inglés, ver figura 3.5 b), el mismo algoritmo usado para procesamiento de imágenes PIV [11] puede ser aplicado para medir los desplazamientos aparentes del patrón de moteado. Por ende, en este trabajo, el software provisto por proVISION-XS de la compañía Integrated Design Tools, Inc. (IDT) es utilizado. El software proVISION-XS realiza el cálculo de los desplazamientos utilizando un novedoso método con una precisión de segundo orden [11]. El proveedor del programa garantiza mejoras y precisión, además de resolución espacial mejores que los métodos tradicionales PIV [10]. Es posible obtener errores confinados a un intervalo de ± 0.025 pixeles para desplazamientos de hasta 9 pixeles. Al utilizarse un arreglo típico de FLMD, las variables más críticas de incertidumbre son el tamaño de la mota, la intensidad de la fuente de iluminación láser, inclinaciones en el vidrio esmerilado y vibraciones. Esta última variable se evade haciendo uso de una mesa óptica neumática como medio aislante durante los 6 experimentos, además de una rutina automática de captura con la cámara. El software incluye múltiples herramientas que facilitan el análisis de nuestras imágenes de moteado. En este estudio, no se aplicó preprocesamiento a las imágenes ni desfase entre las mismas y fue utilizada una ventana de interrogación de 32 pixeles, y la información de los valores de desplazamiento fue interpolada para obtener campos de 50x50 vectores. La figura 3.6 muestra la imagen de moteado de una flama típica

premezclada sobrepuesta con el campo de vectores de desplazamiento calculados por el programa proVISION-XS.

Por otra parte, el espectro de color corresponde a los radicales excitados de CH^* and C_2^* debido al efecto de la reacción química en la flama, mismos que fueron almacenados en los canales azul y verde de la cámara digital respectivamente. Para cada canal de color, los valores de intensidad de la imagen fueron promediados.

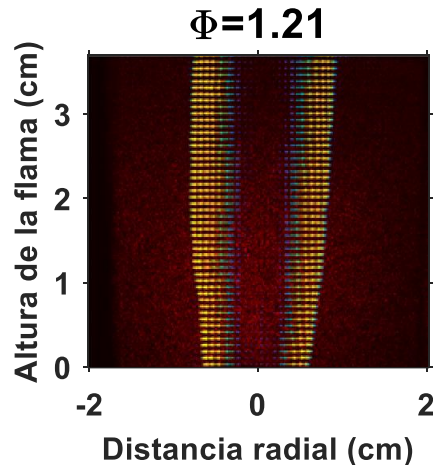


Figura 3.6 Imagen instantánea de moteado con el campo de vectores sobrepuesto para el caso 6 ($\Phi=1.21$).

Dado que las sensibilidades de color se superponen en la mayoría de las cámaras digitales, el efecto de crosstalk debe tenerse en cuenta al estimar el espectro de color. El efecto de “crosstalk” distorsiona los datos registrados y se requieren correcciones para eliminar este efecto de los datos utilizando las ecuaciones (3.12) y (3.13). En estas ecuaciones, los coeficientes de calibración se determinan directamente a partir de la superposición entre la emisión espectral de la flama y la respuesta espectral en cada píxel de la cámara digital (ver figura 3.3). Los valores de los coeficientes A obtenidos del gráfico son: $A_{bB} = 0.3016$, $A_{gB} = 0.0216$, $A_{bG} = 0.2219$ and $A_{gG} = 0.3322$. Como resultado, las ecuaciones (3.12) y (3.13) se pueden reescribir como:

$$I_B = 3.485\hat{I}_b - 2.34\hat{I}_g \quad (3.19)$$

$$I_G = 3.158\hat{I}_g - 0.226\hat{I}_b \quad (3.20)$$

Esta corrección de crosstalk se aplica a cada imagen en color (verde y azul) para cada uno de los casos experimentales.

3.8 Análisis de resultados

Los campos de temperatura de la flama de combustión premezclada se calcularon resolviendo la transformada de Abel (3,12). La figura 3.7, muestra los gráficos de contorno correspondientes de los campos de temperatura promedio para las 6 ejecuciones del experimento.

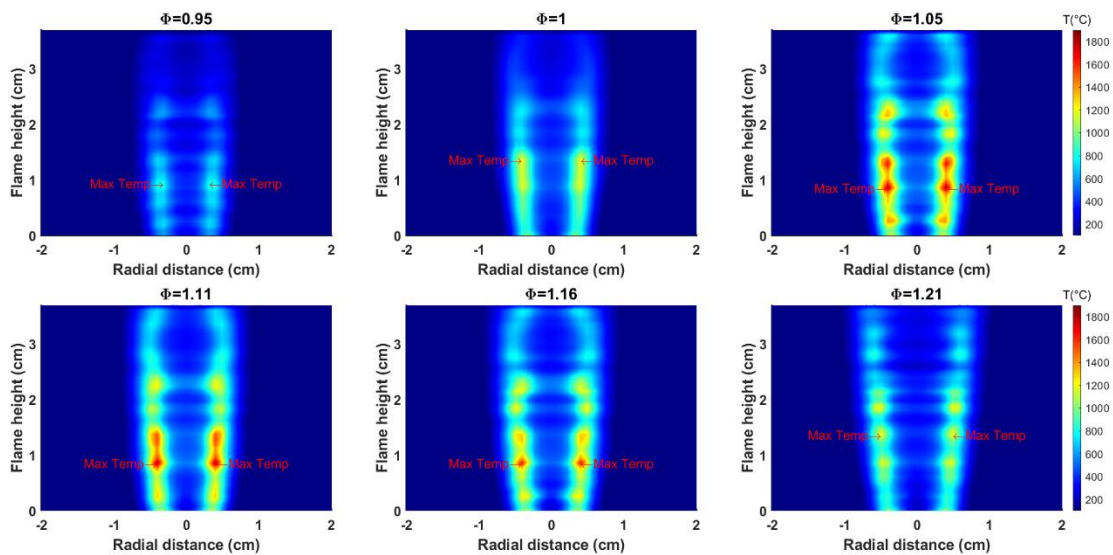


Figura 3.7 Los campos de temperatura promedio calculados para cada caso, comenzando por la parte superior izquierda y luego a la derecha.

La temperatura más alta para cada caso aparece en el borde del núcleo interno de la flama. Hay una caída drástica de temperatura en el centro del campo de temperatura debido a la falta de suficiente oxígeno para la combustión. Para cada ejecución experimental, el valor de temperatura máximo calculado con la transformada numérica de Abel muestra el siguiente conjunto de resultados 838 °C, 1267 °C, 1833 °C, 1820 °C, 1741 °C y 1210 °C. El valor máximo se produce en el tercer ciclo con un caudal de combustible de $0.72 \frac{L}{min}$, probablemente porque este caudal de combustible corresponde a una relación equivalente de 1.05 [6]. Debido a la variabilidad del valor máximo de temperatura que se ubica para cada caso a diferentes distancias, se seleccionó una distancia arbitraria de 1 mm por encima de la

salida de la boquilla del soplete para realizar una medición de termopar y así corroborar la veracidad de los perfiles calculados. Esta distancia sirvió para evitar los posibles efectos de ondulación de la flama. Estas mediciones se compararon con los seis experimentos, los cuales fueron calculados por medio de la transformada de Abel en esta ubicación.

Los perfiles de temperatura calculados coinciden con los obtenidos con un termopar tipo K. Sin embargo, debido al carácter invasivo de la sonda de medición, solo se tomaron unas pocas mediciones cerca del contorno de la flama. La figura 3.8 muestra la comparación de ambos resultados. Además, se obtiene un error absoluto promedio de 12 °C, 10 °C, 22 °C, 24 °C, 13 °C y 26 °C para cada ejecución del experimento. Se debe tomar en cuenta que el error absoluto no sigue una tendencia. Este comportamiento puede deberse a fluctuaciones del flujo de fluido.

En el caso de las mediciones de color espectral de flama, la figura 3.9 muestra imágenes sin corrección de “crosstalk” (figura 3.9a) y después de corrección (figura 3.9b). Las imágenes corregidas son más brillantes y las formas de las flamas están mejor definidas que para los datos originales.

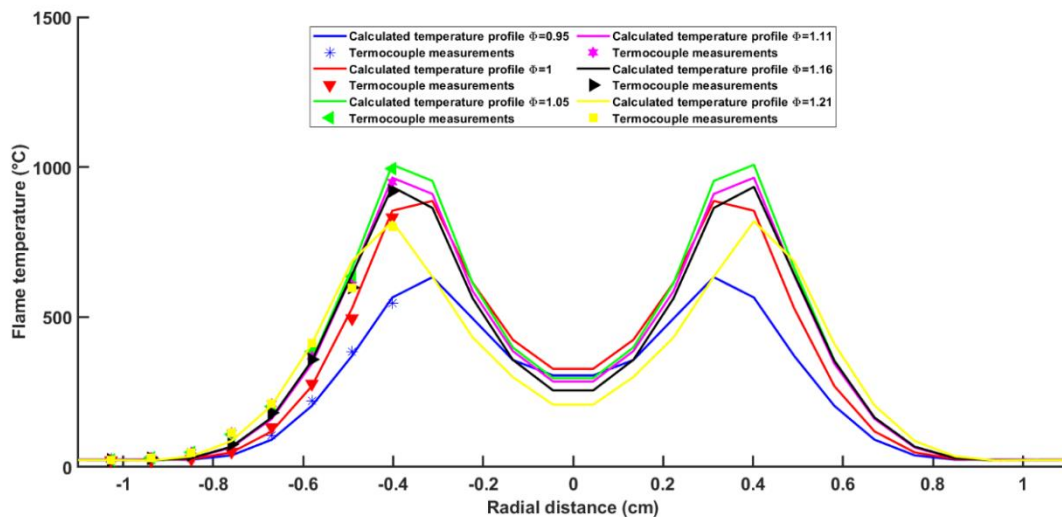


Figura 3.8 Comparación de los perfiles de temperatura calculados contra la medición por termopar para cada caso.

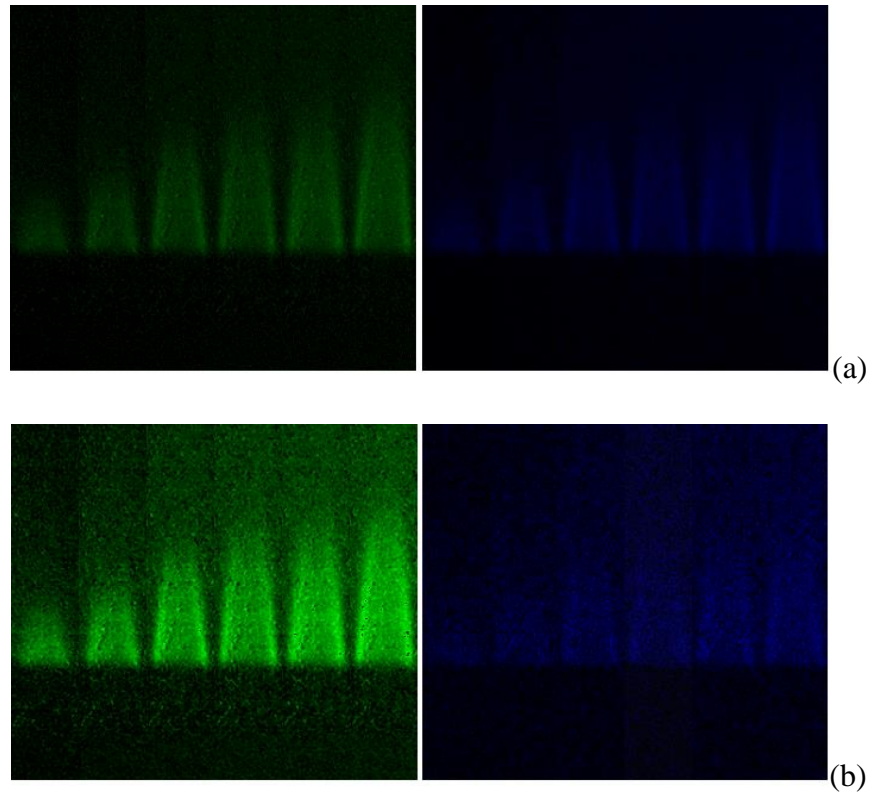


Figura 3.9 Espectro de color de la flama premezclada para cada caso sometido a análisis. Las imágenes superiores (a), no están corregidas contra “crosstalk”. Las de la parte inferior se encuentran ya corregidas (b).

El hecho de que las imágenes del canal verde sean de mejor calidad que el azul puede deberse a varios factores como que el sensor de la cámara digital en color está configurado según el filtro de mosaico de Bayer (este canal de color puede ser más sensible que los otros dos canales de colores), además el radical C_2^* es más luminoso que CH^* debido a la configuración de la cámara digital utilizada en los experimentos (ver figura 3.3), además de que la configuración predeterminada fue la que se utilizó para estudiar qué recibe exactamente la cámara al capturar imágenes de la flama premezclada. Después de realizar la corrección de crosstalk, la forma de la flama se obtiene aplicando el algoritmo de procesamiento de imágenes descrito en la subsección 3.5. La figura 3.10 muestra la forma de la flama obtenida de los canales de color verde y azul para cada caso de análisis.

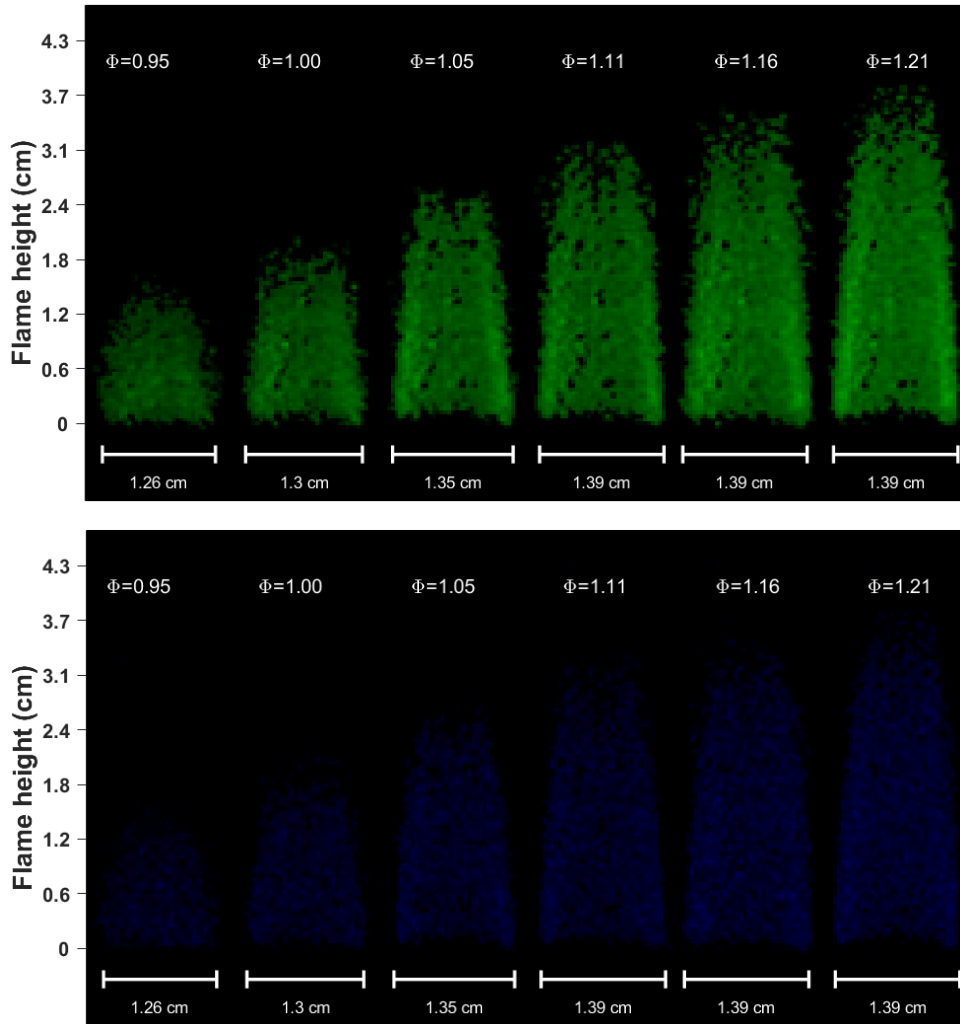


Figura 3.10 Espectro de color de las imágenes de la flama premezclada después de aplicar el algoritmo de la subsección 3.10.

Este proceso reduce el ruido moteado y mejora el contorno de la flama para que su longitud ahora se pueda medir fácilmente. Como consecuencia del proceso de segmentación, hay una ligera pérdida de información en la punta de la misma; estos resultados muestran que la longitud de la flama aumenta a medida que aumenta la razón de equivalencia.

Para estudiar los radicales de emisión CH^* y C_2^* de la flama, se utiliza la información de los canales de la cámara azul y verde. En la figura 3.11, se muestra la relación entre las variaciones de intensidad de imagen de flama promedio de CH^* y C_2^* de una flama premezclada con LPG y la razón de equivalencia.

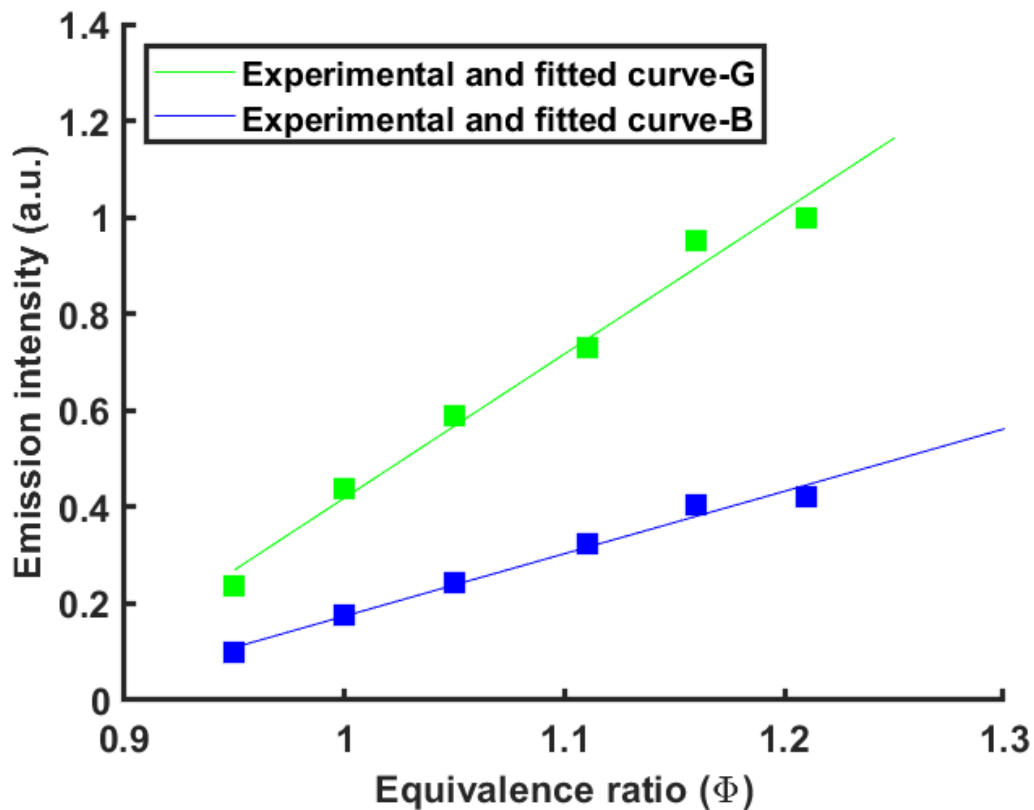


Figura 3.11 Intensidad promedio normalizada para los canales azul y verde. La normalización fue realizada con el valor máximo de intensidad del canal verde.

Se obtuvo un conjunto de 500 imágenes de la flama para calcular las intensidades promedio de los canales de color azul y verde (correspondientes a las emisiones CH^* y C_2^*). Los valores de intensidad promedio de los resultados de los dos canales de color se normalizaron con el valor de intensidad máxima del canal de color verde. La figura 3.11 muestra que ambos siguen un comportamiento lineal. Esta observación es importante porque sugiere fuertemente que los valores de intensidad del canal de color azul y verde se pueden aplicar para monitorear las emisiones de CH^* y C_2^* , respectivamente. Como resultado final, es posible evaluar la distribución de la intensidad del color de las flamas premezcladas utilizando imágenes en color RGB.

3.9 Conclusiones

La novedad de este trabajo es su capacidad para medir simultáneamente y con un sencillo montaje la temperatura y emisión de color de las flamas premezcladas. Se aplicó un sistema FLMD y un algoritmo de procesamiento de imágenes. Una ventaja significativa de esta configuración es su bajo costo, siendo el equipo más costoso la cámara digital de tres colores. Además, no se necesitan filtros ópticos y el sistema tiene baja sensibilidad a las vibraciones y sensibilidad variable. Toda la adquisición de datos se realiza simultáneamente para que se pueda establecer directamente una relación entre el flujo de combustible, la temperatura y las emisiones químicas a partir de los datos, eludiendo las dificultades que surgen al sincronizar dos conjuntos distintos de datos de dos experimentos diferentes. Este método es útil para la caracterización de flamas premezcladas y puede ayudar a analizar diferentes quemadores y tipos de gases.

Referencias

- [1] Turns, S. R. (2012). An introduction to combustion: Concepts and applications.
- [2] Glaude, PA., Sirjean, B., Fournet, R., Bounaceur, R., Vierling, M., Montagne, P., & Molière, M. (2014). Combustion and Oxidation Kinetics of Alternative Gas Turbines Fuels. Volume 3A: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration.
- [3] Glaude, PA., Fournet, R, Bounaceur, R and Moliere, M. (2011). DME as a Potential Alternative Fuel for Gas Turbines: A Numerical Approach to Combustion and Oxidation Kinetics." *Proceedings of the ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 1: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Wind Turbine Technology*. Vancouver, British Columbia, Canada. June 6–10. pp. 649-658. ASME.
- [4] Jones, W. P., Tyliczszak, A. (2010). Large Eddy Simulation of Spark Ignition in a Gas Turbine Combustor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 85(3-4), 711–734.
- [5] Yin, Y., Jiang, Y., Qiu, R., and Xiong, C. (2018). Physical and chemical effects of phosphorus-containing compounds on laminar premixed flame. *Chinese Physics B*, 27(9), 094701.
- [6] Mendoza Orbegoso, Mendoza Orbegoso, E., Silva, EM., Figueira da, LF., Novgorodcev Junior, André R. On the predictability of chemical kinetics for the description of the combustion of simple fuels. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* 33(4): 492-505.
- [7] Huang, X., and Cossairt, O. (2014). Dictionary Learning Based Color Demosaicing for Plenoptic Cameras. 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops.

- [8] Trindade, T., Ferreira, A., Fernandes, E., (2014). Characterization of Combust Chemiluminescence: An Image Processing Approach. *Procedia Technol.* 17:194–201.
- [9] Using Image Processing for Flame Diagnostics: Lundberg, J., Henriksen, M., Gaathaug, A., The 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58) 2017, 25-27 Sep 2017, Reykjavik. Iceland: Proc. of the 58th SIMS; 2017. p.168-173.
- [10] Lumenera corporation: Lt225 Datasheet. Available from: <https://www.lumenera.com/l225.html> [Accessed 15th August 2020. Sjödahl, M. and Benckert, LR. Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy. *Appl. Opt.* 1993; 32(13):2278-2284.
- [11] Lourenco, L. and Krothapalli, A. Mesh-free second order accurate algorithm for PIV processing. In *Proceedings of the International Conference on Optical technology and image processing in fluid thermal and combustion flow*. Visualization Society of Japan, Yokohama, (1998, December).
- [12] Fomin, NA. (1998). *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*. Germany: Springer.

Capítulo 4 Reconstrucción en tres dimensiones del color espectral de flamas.

En la actualidad el estudio de los flujos de fluidos ya no se limita a la caracterización de una sola variable al momento de su estudio, es deseable la medición de distintas características por medio de un solo experimento. Además, la mayoría de los fenómenos son de carácter tridimensional. En el capítulo anterior, se caracterizó la temperatura y el color espectral de una flama simétrica axialmente bajo diferentes condiciones experimentales [1]. Sin embargo, únicamente en los valores de temperatura se consideró el carácter tridimensional del fenómeno utilizando la transformada de Abel. Por lo que, en este capítulo se enfocará en reconstruir en tres dimensiones los perfiles del color espectral de la flama. Así, para realizar estas tareas es necesario la remoción de ruido de moteado y una mejora en el procesamiento de imágenes. En este capítulo, se propone el uso de una ecuación diferencial parcial (EDP) de cuarto orden para la eliminación del ruido residual de moteado, para posteriormente realizar el análisis de la intensidad de la flama (color espectral de ésta) en la cámara, se explicó contiene la información característica del espectro luminiscente de la misma. Pero no limitándonos en 2D, puesto que se ha aplicado la transformada de Abel a la intensidad almacenada en el CCD para poder reconstruir el espectro en 3D, además de realizar un ajuste de curvas por medio una base Gaussiana para su representación como flujos volumétricos.

4.1 Eliminación de ruido de moteado.

Las ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden (EDP) han sido estudiadas como una herramienta útil para realizar procesamiento de imágenes (eliminación de ruido). Algunas de estas incluyen ecuaciones de difusión anisotrópica como las formuladas en [2-4] y derivado de la minimización de la variación total (ver [5], [6] para ejemplo), así como ecuaciones de evolución de curvas que se basan en la ecuación de flujo de calor geométrico de los conjuntos de niveles de la imagen (ver [7-11], por ejemplo).

Aunque se ha demostrado que estas técnicas pueden lograr una buena compensación entre eliminación de ruido y conservación de bordes, tienden a hacer que la imagen procesada se vea “escalonada” como se puede ver en las imágenes en [2], [5] y especialmente como se

reporta en [12]. Este efecto es visualmente desagradable y es probable que haga que un sistema de visión por computadora reconozca falsamente como bordes los límites de diferentes escalones que realmente pertenecen a la misma zona lisa de la imagen original.

Un análisis bastante detallado de los efectos de escalonado asociado con la difusión anisotrópica se lleva a cabo en [13].

4.2 Ecuación de cuarto Orden

En esta sección se propone el uso de una EDP de cuarto orden como técnica para evitar los efectos de escalonado, además de un equilibrio entre la eliminación de ruido de moteado y de la conservación de bordes.

En particular se utiliza una solución de una familia de EDP de cuarto orden propuesta por [14]. Considérese la siguiente función definida en el continuo alrededor de la imagen sometida a análisis.

$$E(u) = \int_{\Omega} f(|\nabla^2 u|) dx dy \quad (4.1)$$

Donde ∇^2 describe al operador Laplaciano en $R^2(x,y)$, el cual corresponde a la imagen. Es necesario que la función $f(\cdot) \geq 0$ sea una función creciente, por tanto:

$$f'(\cdot) \geq 0 \quad (4.2)$$

Así la función es creciente conforme al suavizado de la imagen, esta relación puede ser medida por $|\nabla^2 u|$. Entonces, el minimizar la función es equivalente a suavizar la imagen. Este problema se trata de manera detallada en [14], además de presentar la solución analítica de la ecuación de Euler:

$$f'(|\nabla^2 u|) \frac{\nabla^2 u}{|\nabla^2 u|} = 0 \quad \text{para toda } (x, y) \in \Omega. \quad (4.3)$$

Y que debe cumplir con el criterio

$$f''(s) < 0 \quad (4.4)$$

La cual es la condición para difusión anisotrópica, y por la cual la imagen sufre efectos de escalonamiento. Sin embargo, la propuesta realizada, conlleva a realizar un análisis de la imagen por trozos la cual es una mejor aproximación y genera imágenes menos escalonadas y más naturales.

4.3 Ajuste de curvas por medio de un ajuste Gaussiano

Para reducir aún más el efecto generado por el escalonamiento residual del procesamiento de imágenes generado por la EDP de cuarto grado, se utiliza un ajuste por medio de bases gaussianas. Partiendo de que la transformada de Abel proporciona la proyección del objeto de fase sometido a análisis, lo cual puede ser visto como un “número finito de rebanadas” [15,16]. Se puede realizar el cálculo de la función generadora de estas proyecciones de simetría radial por medio de la siguiente ecuación:

$$z(r) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(r_i) \quad (4.5)$$

Donde la función $f_i(r_i) = \exp\left(-\frac{(r-\mu_i)^2}{2\sigma^2}\right)$, está definida por μ_i que es el corrimiento de la función gaussiana i – ésima, σ que puede ser considerado como un factor de suavizado (distorsión), el cual en este trabajo se calcula por medio de un método iterativo dado por la siguiente ecuación:

$$|y_n - y_{n-1}| < Tol \quad (4.6)$$

Donde y_n es la función calculada en la iteración actual y y_{n-1} , de la iteración anterior, si esta diferencia absoluta es menor que un valor de tolerancia (Tol), seleccionado por el usuario cumpliendo esta condición, se considera el valor σ como el adecuado.

La ecuación (4.5), puede ser representada como una combinación lineal, en notación matricial la función $z(r)$, puede ser representado como:

$$\begin{pmatrix} f_1(r_1) & f_2(r_1) & \dots & f_k(r_1) \\ f_1(r_2) & f_2(r_2) & \dots & f_k(r_2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_1(r_n) & f_2(r_n) & \dots & f_k(r_n) \\ f_1(r_m) & f_2(r_m) & \dots & f_k(r_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{k-1} \\ w_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ z_n \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

El cual es un sistema del tipo $Ax = B$ y que puede ser resuelto para calcular los pesos de cada función gaussiana por medio de la solución del sistema y así obtener la función matemática.

4.4 Transformada de Abel del espectro de emisión de la flama

Debido a las propiedades de la combustión una técnica que ha cobrado auge en los años recientes ha sido la pirometría de relación de color [17-20]. Aquí la intensidad y la emisión de los radicales generados por el espectro de combustión CH^* y C_2^* , los cuales son detectables en el espectro visible, describen de manera apropiado la eficiencia del proceso de combustión. Debido a su simplicidad y a no necesitar equipo complejo ni costoso, se ha vuelto un tema recurrente el uso de cámaras de color para realizar esta tarea. La tarea principal de esta técnica es la reconstrucción del perfil transversal de emisión $R(r, z)$, del área proyectada $P(x, z)$, el cual es grabado en la cámara.

En los capítulos previos de este trabajo se realizó el análisis de flamas premezcladas laminares y con un diámetro pequeño estas funciones están relacionadas por medio de la transformada directa e inversa de Abel [21], las cuales se describen por las ecuaciones ((4.8) y ((4.9) respectivamente.

$$P(x, z) = 2 \int_x^\infty \frac{R(r, z)r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr \quad ((4.8)$$

$$R(r, z) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{\partial P(x, z)}{\partial x} \frac{1}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad ((4.9)$$

Donde z se refiere al eje axisimétrico o la altura de la flama, r es la coordenada cilíndrica y x es la coordenada en el plano de proyección (en este caso en la cámara), ésta última se mide con relación a la parte central del objeto de fase.

Desafortunadamente este proceso conlleva la necesidad de una cantidad elevada de datos para su integración, además de que, si la imagen cuenta con la presencia de ruido, la consecuencia sería una amplificación innegable del error acumulado, de allí la necesidad del

uso del recurso matemático descrito en la sección 0. Así entonces, se realiza el procedimiento siguiente:

1. Captura de imágenes por medio de la cámara CCD.
2. Separación de la imagen en sus componentes RGB.
3. Utilización del filtro de la EDP de cuarto orden.
4. Aplicación de un ajuste de curvas con base gaussianas para el incremento de datos de integración.
5. Aplicación de la transformada de Abel para el cálculo de la sección transversal de la flama.
6. Presentación de resultados.

4.5 Aplicación del procedimiento de procesamiento de imágenes

Primeramente, se realiza la descomposición de las imágenes tanto de referencia ($I_{(n,m)}^{0rgb}$) como deformada ($I_{(n,m)}^{frgb}$), en sus componentes RGB, como se observó previamente en la sección 3.7. Al tener los datos de cada uno de los canales, se procede con los pasos descritos para la generación de eliminación de ruido de fondo únicamente sin aplicar el filtro SVD, esto se describió en la sección 3.5. A continuación, se presentan dos perfiles de los canales G y B, con su ruido inicial.

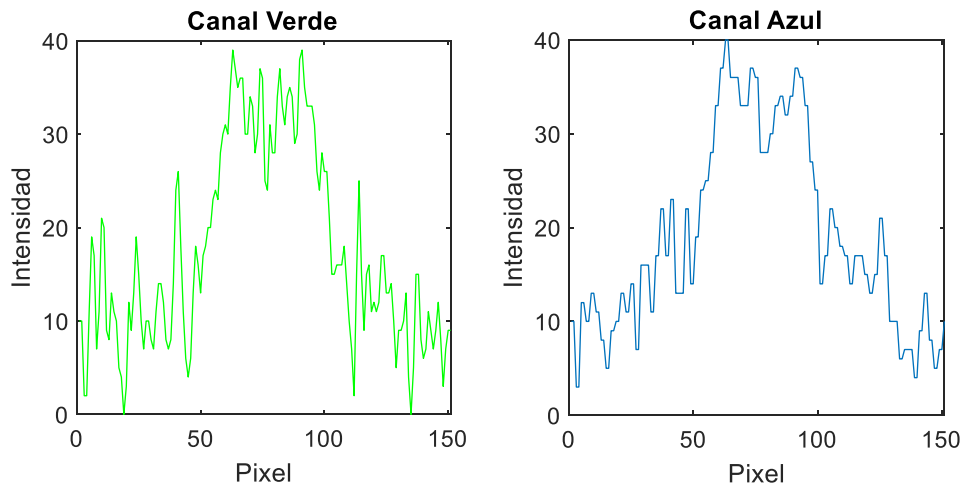


Figura 4.1 Perfiles del espectro de color de la flama para un valor de altura igual al pixel 100.

Para mejorar el procesamiento y tiempo de cálculo se recortó la imagen total de 1280x1024 píxeles a una subregión que abarca de 500:650x700:900, quedando las imágenes actuales y las que se seguirán trabajando con una dimensión de 151x201 píxeles.

Después se procedió a realizar la aplicación del algoritmo relacionado con la EDP de cuarto orden, descrito en la sección 4.2, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

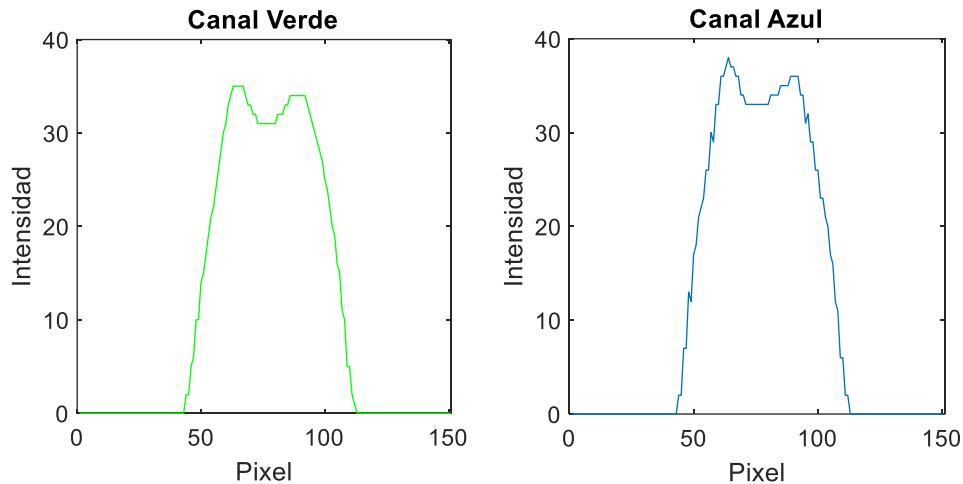


Figura 4.2 Aplicación del filtro iterativo de la EDP de cuarto orden.

Si bien el resultado si contiene cierto escalonamiento, se puede observar una mejora contundente en la desaparición del ruido de moteado, además de que los bordes de la imagen y la parte central no han desaparecido, estas imágenes son para 40 iteraciones. Además de que como se mencionó la imagen sigue teniendo una apariencia natural. En la figura 4.3 se puede observar la comparativa entre el perfil calculado por la EDP de cuarto orden en color rojo, y el ajustado por medio de la base gaussiana, estos resultados fueron generados con un conjunto de 20 funciones gaussianas por perfil, lo cual conllevará a una mejor integración por medio de la transformada de Abel.

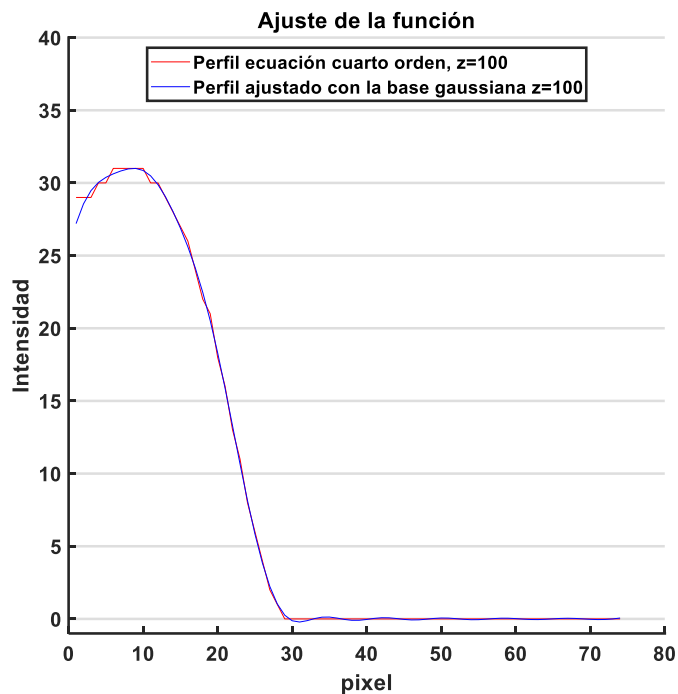


Figura 4.3 Comparativa entre los resultados obtenidos por la EDP de cuarto orden (rojo) y el ajuste por base Gaussiana (azul).

4.6 Resultados flujos volumétricos

Una vez que se ha realizado el ajuste de curvas se procede a aplicar el procesamiento de imágenes descrito en la sección 4.4. Los resultados en el plano para cada uno de los 6 casos experimentales tanto para canal verde (G) y azul (B), se presentan en las siguientes imágenes.

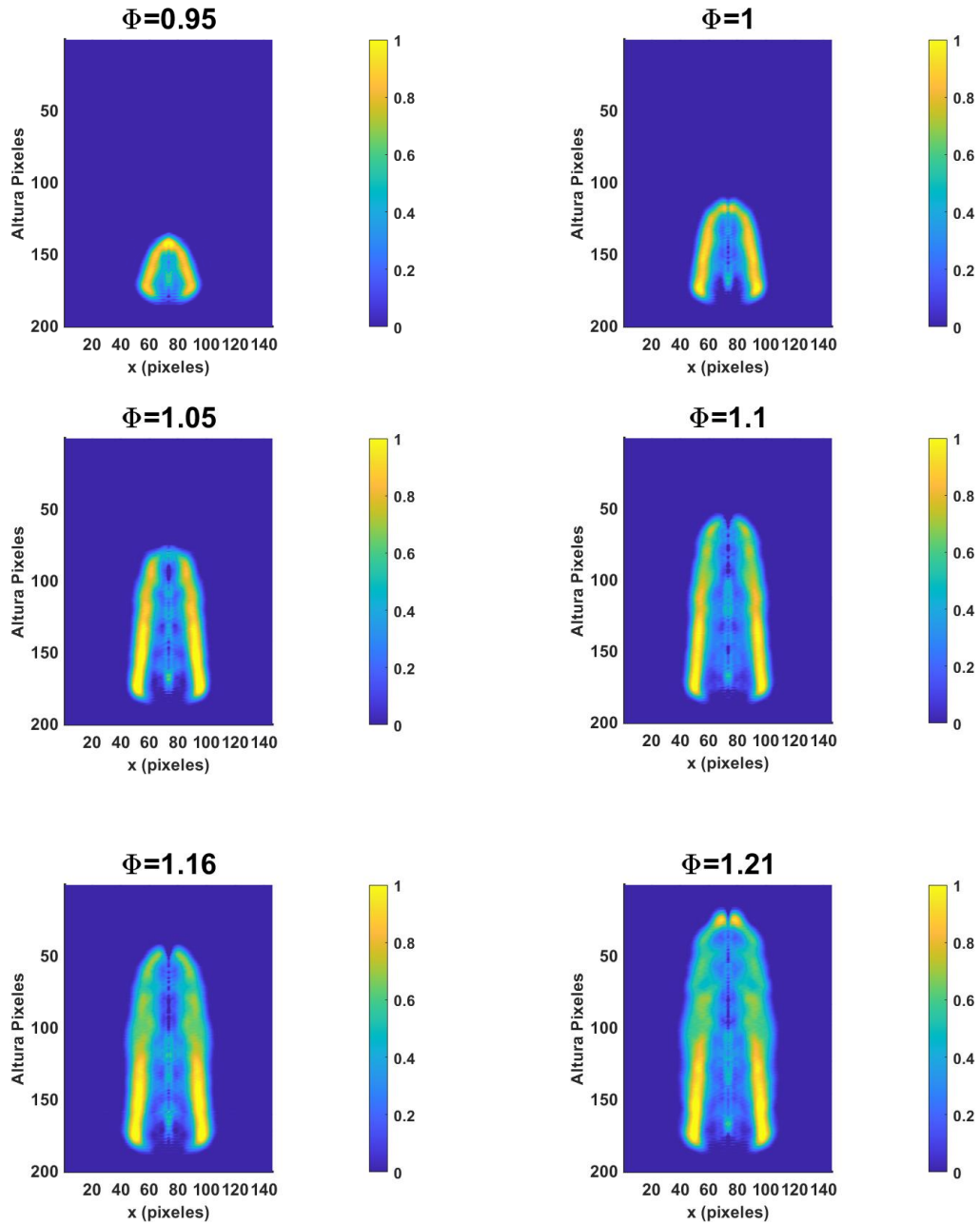


Figura 4.4 Transformada de Abel del canal verde para los 6 casos experimentales.

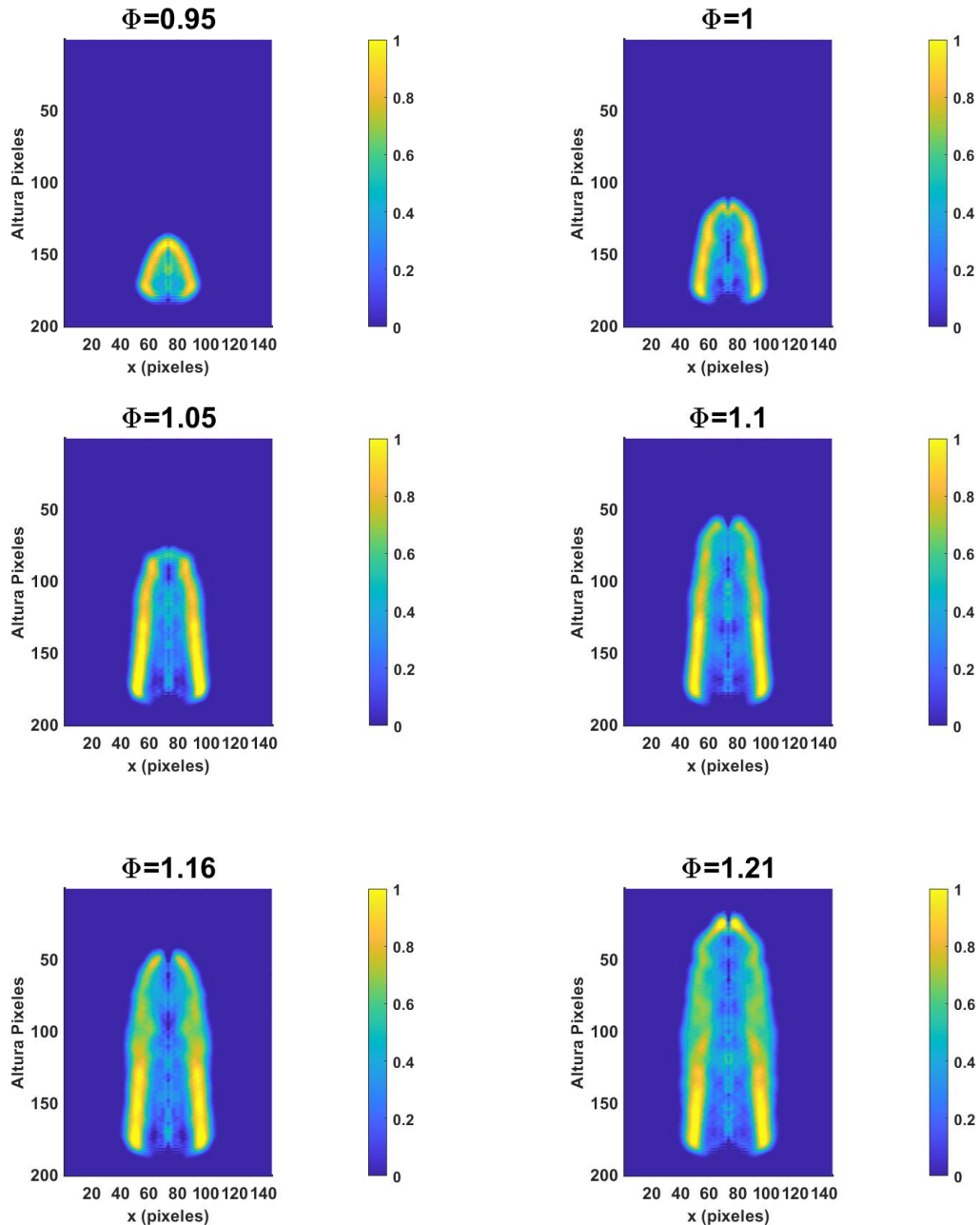


Figura 4.5 Transformada de Abel del canal azul para los 6 casos experimentales.

De las figuras 4.5 y 4.6 se puede observar una eliminación contundente del ruido de moteado, además de una clara definición del contorno de la flama, además de una buena definición de los bordes las regiones de interés para el estudio de radicales tales como CH^* y C_2^* , los cuales se han analizado a lo largo de este trabajo. Además de que la predicción es la mejora en el cálculo de los promedios para el estudio de emisión para cada razón equivalente, como los resultados presentados en la figura 3.11.

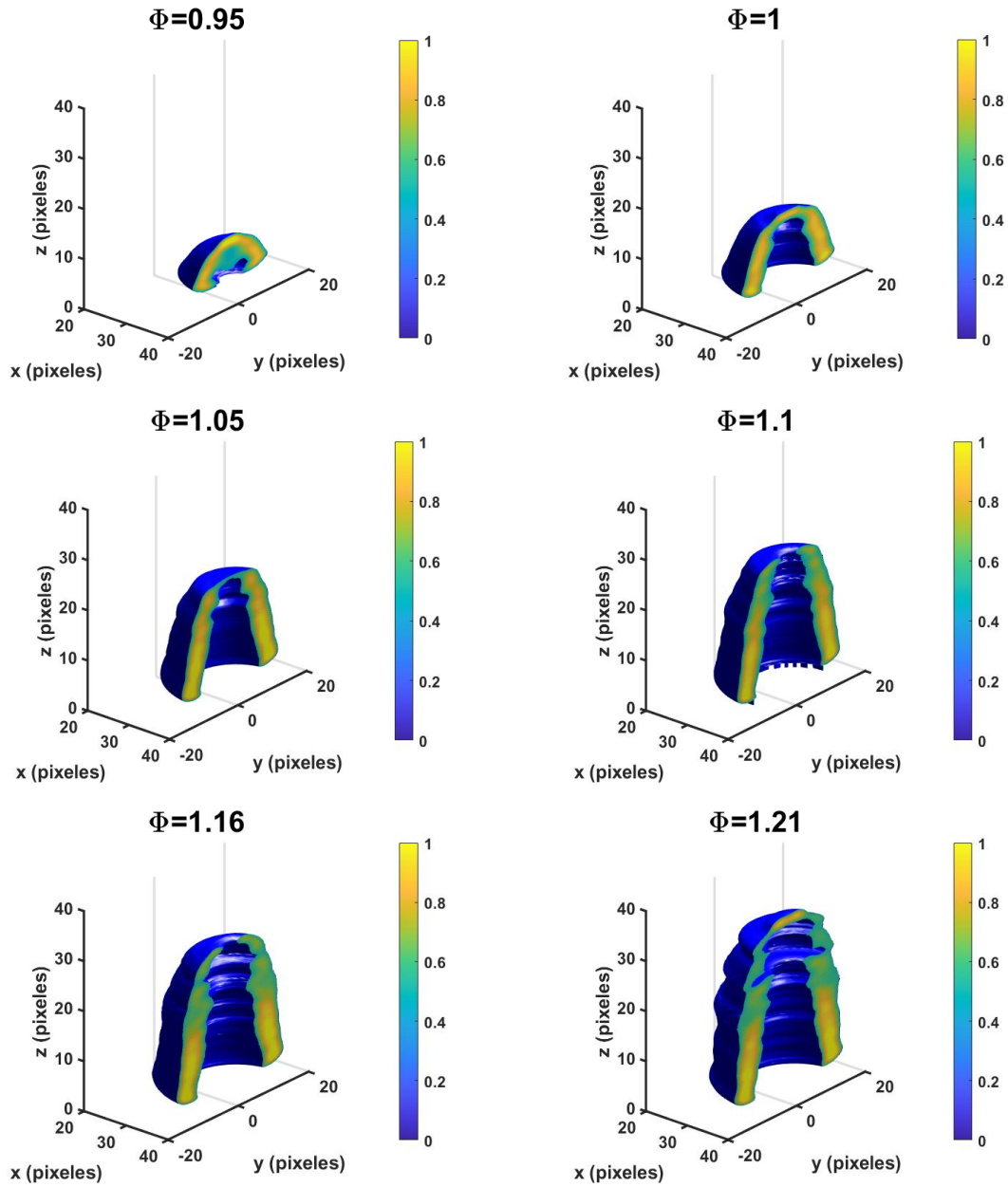


Figura 4.6 Volúmenes de visualización obtenidos de la función matemática calculada por la base gaussiana.

Otra clara ventaja en la realización de este análisis, es el uso no sólo de la base gaussiana para el suavizado del efecto de escalonado, sino que además contribuye a la obtención de la función matemática para la visualización de los resultados en flujo volumétrico, como los que se observan en la figura 4.6.

4.7 Conclusiones

Durante este capítulo se retomaron los datos de las imágenes que contienen la información del espectro de la flama obtenidos en el capítulo previo, se realizó un análisis de estos canales, que son en los cuales se localiza el espectro de emisión de la flama con los radicales sometidos a estudio (CH^* y C_2^*), teniendo como objetivo principal la eliminación del ruido de moteado presente por el arreglo de FLMD. Logrando dejar un efecto prácticamente nulo en el perfil de cada uno de los 6 casos al hacer uso de la EDP de cuarto orden descrita aquí. Cabe mencionar que el efecto residual de escalonado se logró eliminar por medio de un ajuste de curvas por una base gaussiana, mejorando el proceso siguiente de la transformada de Abel, pudiendo así obtener un perfil definido y que destaca las regiones de interés donde se localizan los radicales estudiados, además de poder realizar la reconstrucción de estos perfiles de 2D a flujos volumétricos, los cuales para fines de visualización presentan bastante información, no obstante es imperativo decir que esto también posibilita su aplicación a los perfiles de temperatura.

4.8 Referencias

- [1] Zamarripa Ramirez, J.C.I., Moreno-Hernandez, D., Martínez-González, A. (2021). Simultaneous measurement of temperature and color spectrum of axisymmetric premixed flames using digital laser speckle photography and an image processing approach, *Meas Sci and Technol*, 0957-0233.
- [2] Perona, P. and Malik, J. (1990). Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* vol. 12, pp. 629–639.
- [3] Catte, F., Lions, P.L., Morel, J.M. and Coll, T. (1992). Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion, *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 29, pp. 182–193.
- [4] Kichenassamy, S. *Edge Localization via Backward Parabolic and Hyperbolic PDE*. Minneapolis, MN: Univ. Minnesota.
- [5] Rudin, L.I., Osher, S. and Fatemi, E. (1992). Nonlinear total variation-based noise removal algorithms,” *Physica D*, vol. 60, pp. 259–268.
- [6] Vogel, C. and Oman, M. (1996). Iterative methods for total variation denoising. *SIAM J. Sci. Statist. Comput.*, vol. 17, pp. 227–238, 1996.
- [7] Kimia, B., Tannenbaum, A. and Zucker, S. (1992). On the evolution of curves via a function of curvature I,” *J. Math. Anal. Applicat.*, vol. 163, pp. 438–458.
- [8] Osher, S.J. and Sethian, J.A. (1988). Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *J. Comput. Phys.*, vol. 79, pp. 12–49.
- [9] Sethian, J.A. *Curvature and the evolution of fronts*. (1985). *Commun. Math. Phys.*, vol. 101, pp. 487–499.
- [10] Kimia, D., Tannenbaum, A. and Zucker, S. (1989). *Toward a computational theory of shape: An overview*. McGill University, Montreal, PQ, Canada, Tech. Rep. Cim-89-13.
- [11] Sapiro, G. and Tannenbaum, A. (1993). Affine invariant scale-space. *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 11, no. 1, pp. 25–44.
- [12] Whitaker, R.T. and Pizer, S.M. (1996). A multi-scale approach to nonuniform diffusion,” *Comput. Vis. Graph. Image Process.: Image Understand.*, vol. 57, pp. 99–110, Jan. 1993. [12] Y.-L. You, W. Xu, A. Tannenbaum, and M. Kaveh, “Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, pp. 1539–1553.
- [13] You, Y.L., Xu, W., Tannenbaum, A. and Kaveh, M. (1996). Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing. *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, pp. 1539–1553.
- [14] You, Y.L. and Kaveh, M. (2000). Fourth-order partial differential equations for noise removal. *IEEE Trans. on Image Processing*, 9(10), 1723–1730.
- [15] Rosa-Miranda, E. de la, Berriel-Valdos, L. R., Gonzalez-Ramirez, E., Alaniz-Lumbreras, D., Saucedo-Anaya, T., de la Rosa-Vargas, J. I., Castano, V. M. (2013). An alternative approach to the tomographic reconstruction of smooth refractive index distributions. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 8.

- [16] Dribinski, V., Ossadtchi, A., Mandelshtam, V.A. and Reisler, H. (2002). Reconstruction of Abel-transformable images: The Gaussian basis expansion Abel transform method,” *Rev. Sci. Instrum.* 73, 2634–2642.
- [17] De Falco, G., Porta, A., Petrone, A.M., Del Gaudio, P., El Hassanin, A., Commodo, M., Minutolo, P., Squillace, A. and D’Anna, A. (2017). Antimicrobial activity of flame-synthesized nano-TiO₂ coatings,” *Environ. Sci.: Nano* 4, 1095–1107.
- [18] Kempema, N.J. and Long, M.B. (2018). Effect of soot self-absorption on color-ratio pyrometry in laminar coflow diffusion flames. *Opt. Lett.* 43, 1103–1106.
- [19] Naseri, A., Veshkini, A. and Thomson, M.J. (2017). Detailed modeling of CO₂ addition effects on the evolution of soot particle size distribution functions in premixed laminar ethylene flames. *Combust. Flame* 183, 75–87.
- [20] Apostolopoulos, M., Taroudakis, M., and Papazoglou, D. (2013). Application of inverse Abel techniques in in-line holographic microscopy,” *Opt. Commun.* 296, 25–34.
- [21] Dreyer, J., Slavchov, R., Rees, E., Akroyd, J., Salamanca, M., Mosbach, S., Kraft, M. (2019). Improved methodology for performing the inverse Abel transform of flame images for color ratio pyrometry. *Applied Optics.* 58. 2662.

Capítulo 5 Conclusiones generales y trabajo a futuro

5.1 Conclusiones

Durante este trabajo se partió de la premisa del análisis de temperatura de diferentes campos de flujo generados por distintos objetos de fase, durante este estudio, se realizó una caracterización del sistema de FLMD, determinando cual era el más adecuado para realización de las mediciones descritas, decidiendo utilizar el sistema tipo B, como la más adecuada, debido a su simpleza de montaje y poco empleo de componentes ópticas.

Cabe destacar que se lograron obtener algunos resultados satisfactorios de campos de flujo como los presentados para una resistencia eléctrica cilíndrica, una vela y un soplete de LPG, pudiendo determinar el rango de medición del sistema que va desde $\sim 131^{\circ}\text{C}$ hasta $\sim 1811^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, cabe aclarar que el rango de medición puede ser mayor al límite superior descrito, esto debido a que el algoritmo de correlación utilizado puede medir con eficacia desplazamiento de hasta 9 píxeles con un intervalo de confianza de ± 0.025 píxeles.

Debido a la simetría radial de los objetos se utilizó la transformada de Abel para la caracterización de los mismos, permitiendo una mejora en el cálculo de la temperatura de los tres casos anteriores, además de la posibilidad de extender estos resultados no sólo a 2D sino a 3D.

Durante este periodo de trabajo se utilizó una cámara a color, lo cual trajo como beneficios el análisis de dos variables de manera simultánea, tanto temperatura como el espectro de emisión de la flama, conduciendo a resultados interesantes al revelar la relación inequívoca de estas componentes químicas con el proceso de combustión, ya sea para un valor máximo de temperatura o un mínimo. Estos resultados fueron obtenidos por medio de la realización de 500 imágenes para cada uno de los 6 experimentos, destacando que esto fue posible y se simplificó a lo largo del periodo doctoral, al automatizar la captura de imágenes, debido a que como se mencionó previamente el sistema es sensible a vibraciones, lo cual hace que no sea deseable la interacción continua mientras se estudia el fenómeno. Para garantizar la repetibilidad de los resultados se utilizó una presión constante de 120 psi en el

lado del combustible y un regulador de caudal para la caracterización de cada una de las distintas mezclas, el flujo de aire se mantuvo constante para estos 6 casos (4 aberturas sin cerrar).

Pese a que los resultados del capítulo 3 son satisfactorios y se presenta el cálculo de temperatura de la flama, es innegable la presencia residual del moteado, además de la búsqueda de una mejora en la visualización cualitativa de las regiones con mayor emisión espectro de absorción de los radicales CH^* y C_2^* , generados por el proceso de combustión de la flama, al ver esto como un área de oportunidad se trabajó en el uso de algún filtro para la eliminación de ruido, obteniendo una mejora contundente al hacer uso de una EDP de cuarto orden en los perfiles de la flama para los 2 canales (verde y azul), mejorando los cálculos posteriores de la transformada de Abel, lo cual conllevará a un mejor análisis estadístico de los radicales (CH^* y C_2^*). Por otro lado, el uso de la base gaussiana para el ajuste de curvas y la eliminación de escalonamiento, propicia la presentación de los campos de flujo ya no sólo en 2D sino de extenderlos a 3D.

5.2 Trabajo a futuro

En cuanto a trabajo a futuro debido a que la técnica únicamente se utilizó para el análisis de LPG esto propicia un área de trabajo importante, ya que se puede realizar un estudio de flamas de otros combustibles de uso industrial. Además de la inclusión de un sistema de automatización que permita el uso de válvulas regulables, para la caracterización de distintos flujos volumétricos para una caracterización más precisa.

Otro punto de inflexión es el uso de una sola boquilla de soplete y del análisis de sólo 3 objetos de fase.

5.3 Anexo

Trabajos publicados

- Zamarripa-Ramírez, JC., Moreno-Hernández, D. and Martínez-González, A. (2021). Simultaneous measurement of temperature and color spectrum of axisymmetric premixed flames using digital laser speckle photography and an image processing approach. *Meas Sci and Technol*, 32.

- Martínez-González, A., Moreno-Hernández, D., Guerrero-Viramontes, JA., León-Rodríguez, M., Zamarripa-Ramírez, JCI., Carrillo-Delgado, C. (2019). Temperature Measurement of Fluid Flows by Using a Focusing Schlieren Method. *Sensors* 19.
- Martínez-González, A., Moreno-Hernández, D., Guerrero-Viramontes, JA., Zamarripa-Ramírez, JCI., Carrillo-Delgado, C. (2021). Multiplane temperature measurement of fluid flows using a color focusing schlieren system, *Opt Laser Technol*, 142.